



TUGAS AKHIR – TE 141599

**IMPLEMENTASI DAN EVALUASI KINERJA SISTEM
KOMUNIKASI *M-ARY QUADRATURE AMPLITUDE
MODULATION* (M-QAM) MENGGUNAKAN *WIRELESS
OPEN-ACCESS RESEARCH PLATFORM* (WARP)**

**Fanny Ananta Marpalinda
NRP 2212106027**

**Dosen Pembimbing
Dr. Ir. Suwadi, MT
Dr. Ir. Titiek Suryani, MT**

**JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2015**



FINAL PROJECT – TE 141599

**IMPLEMENTATION AND PERFORMANCE
EVALUATION OF M-ARY *QUADRATURE* AMPLITUDE
MODULATION (M-QAM) COMMUNICATIONS
SYSTEMS USING WIRELESS OPEN-ACCESS
RESEARCH *PLATFORM* (WARP)**

**Fanny Ananta Marpalinda
NRP 2212106027**

**Advisor
Dr. Ir. Suwadi, MT
Dr. Ir. Titiek Suryani, MT**

**ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTEMENT
Faculty Of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institut Of Techology
Surabaya 2015**

**IMPLEMENTASI DAN EVALUASI KINERJA SISTEM
KOMUNIKASI M-ARY QUADRATURE AMPLITUDE
MODULATION (M-QAM) MENGGUNAKAN WIRELESS
OPEN-ACCESS RESEARCH PLATFORM (WARP)**

TUGAS AKHIR

**Diajukan untuk Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada
Bidang Studi Teknik Telekomunikasi Multimedia
Jurusan Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Menyetujui:

Dosen Pembimbing



Dr. Ir Suwadi, MT.
NIP. 19680818 1993031 002

Dosen Pembimbing



Dr. Ir Titiek Suryani, MT.
NIP. 19641130 1989032 001



**Implementasi dan Evaluasi Kinerja Sistem Komunikasi
M-ary Quadrature Amplitude Modulation (M-QAM)
Menggunakan Wireless Open-Access Research Platform
(WARP)**

Nama : Fanny Ananta Marpalinda
Pembimbing : Dr. Ir. Suwadi, MT
Dr. Ir. Titiek Suryani, MT

ABSTRAK

Dalam perkembangan transmisi data pada komunikasi bergerak dibutuhkan sistem yang memiliki keunggulan. Keunggulan itu bisa berupa efisiensi *bandwidth* yang lebih baik, *Bit Error Rate* (BER) yang rendah dan kapasitas *user* yang banyak. Teknik modulasi M-QAM adalah salah satu teknik modulasi digital multi level yang saat ini banyak digunakan pada sistem komunikasi. Hal ini disebabkan karena konstelasi sinyal M-QAM yang tidak begitu rapat dan kemungkinan terjadinya *bit error* lebih kecil. Teknik M-QAM akan diimplementasikan pada WARP secara nyata dan *real-time* untuk mengevaluasi seberapa baik kinerja teknik modulasi M-QAM pada lingkungan *indoor* dan *outdoor*. Untuk mengevaluasi hingga level berapa teknik modulasi M-QAM dapat diimplementasikan pada WARP dengan menggunakan Matlab versi 2012 WARP versi 7.1. Nilai BER semakin besar terhadap bertambahnya jarak antar node untuk daya pancar tetap, ini menandakan jarak sangat mempengaruhi kualitas kinerja teknik modulasi M-QAM pada WARP, dimana nilai BER untuk 4-QAM mencapai nilai 0 untuk jarak 4 meter hanya membutuhkan daya pancar -26 dBm, nilai ini lebih kecil jika dibandingkan dengan daya pancar yang dibutuhkan pada saat jarak 5 meter dan 6 meter yaitu -23,5 dan -20. Hasil pengukuran di lingkungan *outdoor* memiliki nilai BER yang lebih kecil dibandingkan saat pengukuran di lingkungan *indoor*. Dimana nilai BER untuk 4-QAM kondisi *outdoor* mencapai nilai nol saat daya yang dipancarkan sebesar -26 dBm sedangkan untuk kondisi *indoor* pada jarak dan level modulasi yang sama, daya pancar yang dibutuhkan untuk mencapai BER sama dengan nol adalah -21,2 dBm.

Kata Kunci : *Bit Error Rate*, M-QAM, *Single-Input Single-Output*, *Software Defined Radio*, *Wireless Open-Access Research Platform*

Halaman ini sengaja dikosongkan

Implementation and Performance Evaluation of M-ary Quadrature Amplitude Modulation (M-QAM) Communications Systems Using Wireless Open-Access Research Platform (WARP)

Name : Fanny Ananta Marpalinda
Advisor : Dr. Ir. Suwadi, MT
Dr. Ir. Titiek Suryani, MT

ABSTRACT

In the development of data transmission in mobile communication systems have the advantage needed. The advantages that can be a better bandwidth efficiency, the value of Bit Error Rate (BER) is low and the capacity of many users. M-QAM modulation technique is one of the multi-level digital modulation technique is currently widely used in communication systems. This is because the M-QAM signal constellation that is not so tight and the possibility of bit error is smaller. M-QAM technique will be implemented in real WARP and real-time to evaluate how well the M-QAM modulation techniques in indoor and outdoor environment. and to evaluate M-QAM level modulation technique can be implemented in WARP using Matlab version of the 2012 and WARP 7.1 version. BER value greater with increasing distance between nodes to transmit power fixed, it indicates the distance greatly affect the quality of the performance of the M-QAM modulation technique in WARP, where the value for 4-QAM BER reaches a value of 0 for a distance of 4 meters only requires -26 dBm transmit power, this value is smaller when compared with the transmit power required at the distance of 5 meters and 6 meters are -23.5 and -20. The results of measurements in outdoor environments BER value is smaller than the measurement in the indoor environment where the BER value of the 4-QAM for outdoor conditions to zero when power is radiated at -26 dBm while the indoor conditions at a distance and the same level of modulation, transmit power required to achieve zero value of BER is -21.2 dBm zero

Keywords: *Bit Error Rate, M-QAM, Single-Input Single-Output, Software Defined Radio, Wireless Open-Access Research Platform*

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur hanyalah milik Allah SWT yang telah memberikan penulis umur dan hidayah untuk menyelesaikan penulisan Tugas Akhir dengan judul :

“Implementasi dan Evaluasi Kinerja Sistem Komunikasi M -ary Quadrature Amplitude Modulation (M-QAM) Menggunakan Wireless Open-Access Research Platform (WARP) ”

Tugas Akhir ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar Magister pada Program Studi Teknik Elektro, Bidang Keahlian Telekomunikasi Multimedia, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Pada kesempatan ini penulis sampaikan banyak terima kasih kepada :

1. Kedua orang tua dan adik tercinta atas dukungan dalam segala hal. Semoga Allah masih memberi saya kesempatan membalas jasa-jasa mereka.
2. Dr. Ir. Suwadi, MT dan Dr. Ir. Titiek Suryani, MT selaku dosen pembimbing, terima kasih atas bimbingan serta masukan yang diberikan selama masa perkuliahan dan juga dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
3. Bapak dan ibu dosen pengajar bidang studi Teknik Telekomunikasi dan Multimedia, Jurusan Teknik Elektro atas ilmu dan bimbingannya.
4. Rekan-rekan TMM LJ 2012 khususnya tim riset WARP atas kerja samanya.
5. Keluarga besar Lab. Komunikasi Multimedia atas kerja samanya.

Surabaya, Januari 2015

Penulis,
Fanny Ananta Marpalinda

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR.....	i
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
ABSTRAK.....	v
ABSTRACT.....	vii
KATA PENGANTAR	ix
DAFTAR ISI.....	xi
DAFTAR GAMBAR.....	xiii
DAFTAR TABEL.....	xv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan Tugas Akhir	2
1.5 Metodologi Penelitian	2
1.6 Sistematika Penelitian	4
BAB II TEORI PENUNJANG.....	7
2.1 Karakteristik Komunikasi Digital	7
2.1.1 Data Rate Dan Bandwidth	7
2.1.2 Jumlah Bit Error	8
2.1.3 Kapasitas Kanal Komunikasi.....	8
2.2 Modulasi Digital	10
2.2.1 <i>M</i> -ary Quadrature Amplitude Modulation (M-QAM)....	10
2.2.2 Penentuan Amplitudo Sinyal	11
2.2.3 Gray Mapping (Gray Coding)	12
2.2.4 Probabilitas Error Pada M-QAM	15
2.3 Filter Raised Cosine	17
2.4 Teknik Estimasi BER (Bit Error Rate).....	20
2.5 Software Defined Radio (SDR).....	20
2.6 Wireless Open Access Research Platform (WARP).....	21
2.6.1 Arsitektur Platform	22
2.6.2 Design Arsitektur WARPLab	23
2.6.3 Gambaran Framework WARPLab	25
2.6.4 Spesifikasi WARPLab	26
BAB III METODE PENELITIAN.....	29
3.1 Integrasi PC dengan modul WARP.....	29
3.2 Pemodelan Sistem Komunikasi SISO dengan Teknik Modulasi M-QAM	31
3.3 Metode Pengukuran	34
3.3.1 Pengukuran Lingkungan Indoor	34

3.3.2	Pengukuran Lingkungan <i>Outdoor</i>	34
3.3.3	Metode Perhitungan <i>Bit Error Rate</i> (BER).....	34
BAB IV	HASIL DAN PEMBAHASAN	37
4.1	Proses Sistem Komunikasi SISO dengan Teknik Modulasi M-QAM.....	37
4.2	Analisa Hasil Pengukuran dengan Teknik Modulasi M- QAM (<i>Indoor</i>).....	49
4.2.1	Kondisi <i>Line of Sight</i> (LOS).....	49
4.2.2	Kondisi <i>Non Line of Sight</i> (NLOS)	52
4.3	Analisa Hasil Pengukuran dengan Teknik Modulasi M- QAM (<i>Outdoor</i>).....	55
4.3.1	Kondisi <i>Line of Sight</i> (LOS).....	55
4.3.2	Kondisi <i>Non Line of Sight</i> (NLOS)	60
BAB V	PENUTUP	677
5.1	Kesimpulan.....	677
5.2	Saran	68
DAFTAR PUSTAKA	.....	69
LAMPIRAN A	.....	71
LAMPIRAN B	.....	73
LAMPIRAN C	.....	75
RIWAYAT HIDUP	.....	85

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Diagram Alir Pengerjaan Tugas Akhir	5
Gambar 2.1 Proses Modulasi M-QAM	11
Gambar 2.2 Proses Demodulasi M-QAM	11
Gambar 2.3 Konstelasi sinyal 4-QAM	12
Gambar 2.4 Konstelasi sinyal 8-QAM	13
Gambar 2.5 Konstelasi sinyal 16-QAM	13
Gambar 2.6 Konstelasi sinyal 64-QAM	14
Gambar 2.7 Diagram ruang sinyal untuk rectangular QAM	14
Gambar 2.8 Dua konstelasi sinyal QAM dengan $M=4$	16
Gambar 2.9 Empat konstelasi sinyal untuk 8-QAM	16
Gambar 2.10 Grafik probabilitas <i>error</i> simbol M-QAM	17
Gambar 2.11 <i>Transfer Function</i> Sistem	19
Gambar 2.12 <i>Impulse Response</i> Sistem	19
Gambar 2.13 Arsitektur SDR	21
Gambar 2.14 Komponen-komponen Platform	23
Gambar 2.15 Design Arsitektur WARPLab	25
Gambar 2.16 <i>Setup</i> WARPLab	25
Gambar 3.1 Konfigurasi sistem komunikasi SISO dengan WARP	29
Gambar 3.2 Indikator keberhasilan Integrasi PC dengan WARP	30
Gambar 3.3 Blok Diagram Sistem Komunikasi SISO dengan Teknik Modulasi M-QAM	32
Gambar 3.4 Pengukuran pada Lingkungan <i>Indoor</i> untuk kondisi LOS	35
Gambar 3.5 Pengukuran pada Lingkungan <i>Indoor</i> untuk kondisi NLOS	35
Gambar 3.6 Pengukuran pada Lingkungan <i>Outdoor</i> untuk kondisi LOS	36
Gambar 3.7 Pengukuran pada Lingkungan <i>Outdoor</i> untuk kondisi NLOS	36
Gambar 4.1 Data yang dikirim dalam bentuk bit	37
Gambar 4.2 Data yang dikirim dalam ditambah preamble	38
Gambar 4.3 Data yang dikirim dalam bentuk simbol melewati filter raised cosine	39
Gambar 4.4 Hasil <i>filter</i> SRRC pada simbol (a) inphase dan (b) <i>quadrature</i>	39
Gambar 4.5 Hasil <i>upconvert</i> (a) inphase dan (b) <i>quadrature baseband</i>	40
Gambar 4.6 Spektrum sinyal sebelum ditransmisikan	40
Gambar 4.7 Sinyal (a) inphase dan (b) <i>quadrature</i> pada penerima	41
Gambar 4.8 Sinyal (a) in-phase dan (b) <i>quadrature</i> setelah proses <i>downconvert</i> pada pe	

Gambar 4.9	Sinyal (a) inphase dan (b) <i>quadrature</i> setelah matched <i>filtering</i>	42
Gambar 4.10	Nilai korelasi tertinggi sinyal yang diterima	43
Gambar 4.11	Sample sinyal pertama yang diterima dan setelah downsample.....	43
Gambar 4.12	Estimasi (a) magnitudo kanal dan (b) fasa kanal SISO dengan teknik modulasi M-QAM.....	44
Gambar 4.13	Perbandingan Simbol In-Phase	45
Gambar 4.14	Perbandingan Simbol <i>Quadrature</i>	45
Gambar 4.15	Konstelasi simbol 4-QAM pada penerima	46
Gambar 4.16	Konstelasi simbol 8-QAM pada penerima	47
Gambar 4.17	Konstelasi simbol 16-QAM pada penerima	47
Gambar 4.18	Konstelasi simbol 32-QAM pada penerima	48
Gambar 4.19	Konstelasi simbol 64-QAM pada penerima	48
Gambar 4.20	Grafik BER Indoor jarak 4 meter kondisi LOS	50
Gambar 4.21	Grafik BER Indoor jarak 5 meter kondisi LOS	51
Gambar 4.22	Grafik BER Indoor jarak 6 meter kondisi LOS	52
Gambar 4.23	Grafik BER Indoor jarak 4 meter kondisi NLOS	53
Gambar 4.24	Grafik BER Indoor jarak 5 meter kondisi NLOS	54
Gambar 4.25	Grafik BER Indoor jarak 6 meter kondisi NLOS	55
Gambar 4.26	Grafik BER Outdoor jarak 4 meter kondisi LOS	56
Gambar 4.27	Grafik BER Outdoor jarak 5 meter kondisi LOS	60
Gambar 4.28	Grafik BER Outdoor jarak 6 meter kondisi LOS	60
Gambar 4.29	Grafik BER Outdoor jarak 4 meter kondisi NLOS	63
Gambar 4.30	Grafik BER Outdoor jarak 5 meter kondisi NLOS	63
Gambar 4.31	Grafik BER Outdoor jarak 6 meter kondisi NLOS	65
Gambar 4.32	Grafik perbandingan BER 4-QAM dan 8-QAM pada lingkungan <i>indoor</i> dan <i>outdoor</i> pada jarak 4 meter kondisi LOS	65
Gambar 4.33	Grafik perbandingan BER 4-QAM dan 8-QAM pada lingkungan <i>outdoor</i> pada jarak 5 meter kondisi LOS....	66
Gambar 4.34	Grafik perbandingan BER 4-QAM untuk jarak 4, 5, dan 6 meter pada lingkungan <i>outdoor</i>	66

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1	Parameter Sistem Komunikasi SISO dengan Teknik Modulasi M-QAM.....	31
Tabel 4. 1	Data Hasil pengukuran <i>Indoor</i> untuk kondisi LOS dengan jarak 4 meter	49
Tabel 4. 2	Data Hasil pengukuran <i>Indoor</i> untuk kondisi LOS dengan jarak 5 meter	50
Tabel 4. 3	Data Hasil pengukuran <i>Indoor</i> untuk kondisi LOS dengan jarak 6 meter	51
Tabel 4. 4	Data Hasil pengukuran <i>Indoor</i> untuk kondisi NLOS dengan jarak 4 meter	53
Tabel 4. 5	Data Hasil pengukuran <i>Indoor</i> untuk kondisi NLOS dengan jarak 5 meter	53
Tabel 4. 6	Data Hasil pengukuran <i>Indoor</i> untuk kondisi NLOS dengan jarak 6 meter	56
Tabel 4. 7	Data Hasil pengukuran <i>Outdoor</i> untuk kondisi LOS dengan jarak 4 meter	57
Tabel 4. 8	Data Hasil pengukuran <i>Outdoor</i> untuk kondisi LOS dengan jarak 5 meter	58
Tabel 4. 9	Data Hasil pengukuran <i>Outdoor</i> untuk kondisi LOS dengan jarak 6 meter	59
Tabel 4. 10	Data Hasil pengukuran <i>Outdoor</i> untuk kondisi NLOS dengan jarak 6 meter	61
Tabel 4. 11	Data Hasil pengukuran <i>Outdoor</i> untuk kondisi NLOS dengan jarak 5 meter	62
Tabel 4. 12	Data Hasil pengukuran <i>Outdoor</i> untuk kondisi NLOS dengan jarak 6 meter	64

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dalam perkembangan transmisi data pada komunikasi bergerak dibutuhkan sistem yang memiliki keunggulan. Keunggulan itu bisa berupa efisiensi *bandwidth* yang lebih baik, *Bit Error Rate* (BER) yang rendah, kapasitas *user* yang banyak dan sebagainya. Teknik modulasi merupakan salah satu faktor yang menentukan keunggulan tersebut. Teknik modulasi digital telah dikembangkan penggunaannya secara luas dalam berbagai layanan komunikasi. Dengan modulasi digital, sinyal informasi dalam bentuk *binary digit* (bit-bit) dimodulasi dan dikirimkan melalui kanal komunikasi (saluran transmisi) untuk dapat disampaikan ke penerima. Idealnya sampai di penerima, semua urutan bit-bit diterima dengan benar dan tidak terjadi kesalahan pengiriman. Namun dalam prakteknya tidak semua bit-bit dapat diterima dengan benar. Dalam hal ini tidak dapat dihindari terjadinya kesalahan bit (*bit error*) saat bit bit informasi dikirimkan melalui kanal komunikasi.

Penyebab terjadinya *bit error* dapat berasal dari kondisi kanal komunikasi yang dipengaruhi oleh berbagai macam gangguan, baik dari dalam sistem itu sendiri, yang disebut bising (*noise*) dan gangguan dari luar sistem, yang dinamakan dengan interferensi (*interference*). *Noise* yang umum terjadi pada sistem komunikasi adalah *Additive White Gaussian Noise* (AWGN), yaitu *noise* dengan rapat daya konstan dan terdistribusi secara gaussian. Sedangkan interferensi dapat disebabkan oleh adanya fading. Fading terjadi karena perubahan sudut atau phase, polarisasi dan atau perubahan level sinyal terhadap waktu, sehingga sinyal yang diterima berubah dengan cepat. Perubahan periodik dari selubung satu komponen multipath atau selubung sinyal fading datar (*flat fading*) pada transmisi *No Line Of Sight* (NLOS) yang terdistribusi secara Rayleigh disebut dengan *Rayleigh Fading*.

Teknik modulasi M-QAM adalah salah satu teknik modulasi digital multi level yang saat ini banyak digunakan pada sistem komunikasi. Hal ini disebabkan karena konstelasi sinyal M-QAM yang tidak begitu rapat dan kemungkinan terjadinya *bit error* lebih kecil, bila dibandingkan dengan sistem modulasi lainnya seperti M-ary *Quadrature Phase Shift Keying* (M-QPSK). Teknik M-QAM akan diimplementasikan pada WARP secara nyata dan *real-time* untuk mengetahui seberapa besar kemampuan M-QAM bekerja pada WARP. WARP didesain untuk memenuhi riset sistem komunikasi nirkabel dengan kinerja yang tinggi. WARP mempunyai WARPLab yang merupakan salah satu dari *software defined radio* (SDR), dimana sistem

komunikasi M-QAM ini diimplementasikan pada WARP untuk meminimalisasi kesalahan yang terjadi, karena SDR bersifat *programmable* yang dapat di-*program* ulang dan fleksibel.

1.2 Perumusan Masalah

Masalah yang diharapkan untuk ditemukan solusinya melalui tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Seberapa baik kinerja teknik modulasi M-QAM pada lingkungan *indoor*
2. Seberapa baik kinerja teknik modulasi M-QAM pada lingkungan *outdoor*
3. Sampai orde berapa teknik modulasi M-QAM dapat diimplementasikan pada WARP.

1.3 Batasan Masalah

Untuk menyelesaikan permasalahan-permasalahan yang ada, maka dalam prakteknya akan dibatasi seperti:

1. Matlab yang digunakan merupakan matlab versi 2012.
2. WARP yang digunakan merupakan WARP versi 7.1
3. Modulasi yang digunakan yaitu M-QAM.
4. Daerah pengukuran dibatasi dalam lingkungan *indoor* dan *outdoor*.

1.4 Tujuan Tugas Akhir

Tujuan dan capaian yang diharapkan tercapai setelah selesainya tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui kualitas unjuk kerja teknik M-QAM pada lingkungan *indoor*
2. Mengetahui kualitas unjuk kerja teknik M-QAM pada lingkungan *outdoor*
3. Mengetahui sampai orde berapa M-QAM dapat bekerja pada *platform* WARP

1.5 Metodologi Penelitian

Metodologi yang digunakan pada pengerjaan tugas akhir ini dijabarkan dengan diagram alir pada Gambar 1.1. Metode yang dijabarkan diatas bisa digolongkan sebagai berikut:

1. Studi Pustaka
Untuk teori yang dijadikan rujukan berkaitan dengan materi

yang dibahas pada tinjauan pustaka. Studi pustaka juga akan mengambil sumber-sumber yang berkaitan dengan:

- Teori-teori yang dijabarkan pada bagian ruang lingkup tugas akhir
- Simulasi sistem komunikasi
- Desain teknik modulasi digital
- Desain penerima digital
- Referensi pemrograman modul WARP
- Referensi WARPLab

2. Perumusan parameter unjuk kerja dan metode pengukurannya

Sebelum proses pengukuran bisa berjalan, parameter performansi, yaitu yang menunjukkan kualitas unjuk kerja sistem komunikasi, dirumuskan dan ditentukan metode pengukurannya. Pada tahapan ini, akan ditentukan misalnya, band frekuensi pengukuran, informasi yang akan dipancarkan, jumlah-jumlah bit yang akan ditransmisikan, kondisi frame yang dipancarkan, proses pengukuran kanal khususnya untuk metode MRC. Parameter yang diambil sebagai acuan performansi adalah *bit error rate* (BER).

3. Simulasi sistem komunikasi

Proses simulasi sistem komunikasi dilakukan dengan menguji kinerja dari M-QAM. Proses simulasi menggunakan MATLAB. Proses simulasi ini untuk menentukan algoritma yang digunakan pada saat pengukuran. Simulasi juga bertujuan untuk memastikan algoritma yang digunakan sesuai dengan teori sistem komunikasi.

4. Implementasi pada modul WARP

Simulasi akan diterapkan pada modul WARP namun dengan kondisi lingkungan indoor yang real. Proses implementasi dilakukan dengan menggunakan *software* WARPLab.

5. Pengukuran pada lingkungan indoor

Setelah modul WARP bisa digunakan untuk simulasi dengan kondisi kanal real, maka proses pengukuran dapat dilakukan. Pada tahapan ini, dilakukan pengumpulan data untuk berbagai kondisi parameter yang ditentukan, misalnya, berbagai macam modulasi digital, daya pancar yang berbeda untuk jarak tertentu, komunikasi LoS (*Line-of-Sight*) dan nLOS (*non Line-of-Sight*) dan ukuran ruangan tertentu. Tujuan akhirnya adalah menentukan seberapa baik unjuk kerjanya yang ditunjukkan oleh BER.

6. Proses analisa data dan pengambilan kesimpulan

Analisa data dan pengambilan kesimpulan mengacu pada data hasil pengukuran.

7. Dokumentasi penelitian

Tahapan akhir ini meliputi pembuatan laporan tugas akhir dan penulisan jurnal ilmiah. Pembuatan laporan tugas akhir untuk beberapa bagian dilakukan bersesuaian dengan pengerjaan tahapan-tahapan diatas. Sedangkan jurnal ilmiah dilakukan setelah laporan tugas akhir selesai.

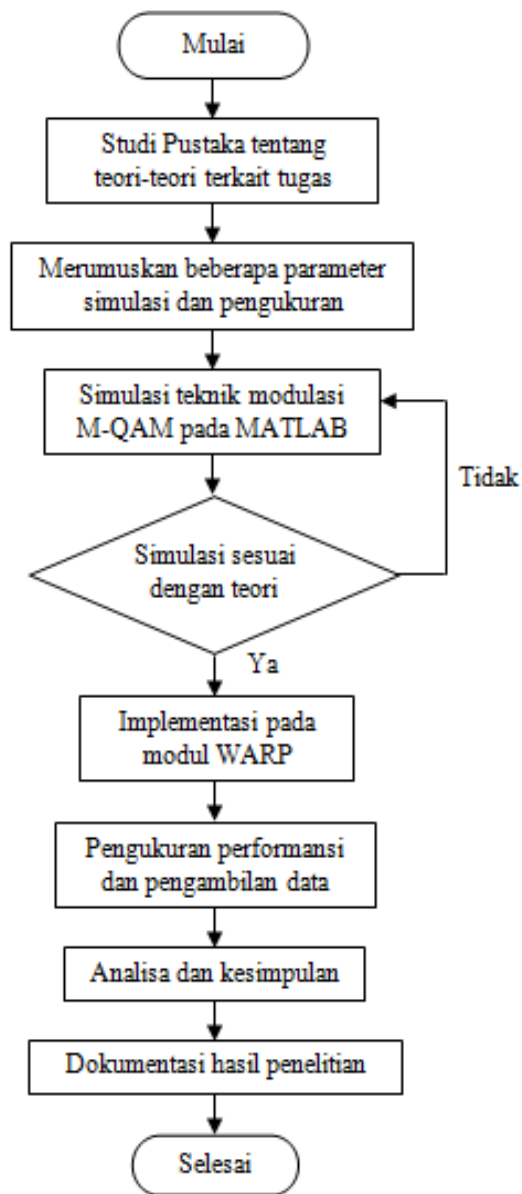
1.6 Sistematika Penelitian

Proses penelitian yang tersusun dalam laporan tugas akhir dapat dijabarkan sebagai berikut:

- BAB 1, Bagian ini akan membahas tentang latar belakang, tujuan dan permasalahan-permasalahan yang dihadapi dan hasil akhir yang diinginkan dalam pengerjaan tugas.
- BAB 2, Bagian ini melakukan mengenai tema-tema terkait yang membantu dalam proses perumusan masalah sistem. Tema-tema tersebut juga digunakan sebagai acuan awal dalam penyelesaian permasalahan.
- BAB 3, Bagian ini membahas tentang proses desain sistem, kendala-kendala serta penyelesaiannya dalam bentuk implementasi pada alat.
- BAB 4, Bagian ini akan membahas mengenai sistematika pengukuran dan hasilnya. Pada bab tersebut juga dilakukan analisis awal terhadap data-data hasil pengukuran.
- BAB 5, Bagian ini akan membahas kesimpulan dan saran berdasarkan hasil-hasil analisa pada bab 4 sebelumnya.

Manfaat yang diharapkan tercapai pada proses penelitian ini adalah sebagai berikut:

- Mengetahui kendala-kendala dalam proses desain sistem komunikasi dan bagaimana cara menyelesaikannya
- Memahami cara kerja sistem komunikasi SISO
- Memberikan kontribusi tentang proses desain dan implementasi modulasi M-QAM pada WARP



Gambar 1.1 Diagram Alir Pengerjaan Tugas Akhir

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB II

TEORI PENUNJANG

Pada bab ini akan dijabarkan dasar teori yang menjadi acuan dalam pengerjaan penelitian. Pembahasan teori dalam bab 2 memiliki tujuan antara lain:

2.1 Karakteristik Komunikasi Digital

Komunikasi digital adalah komunikasi berbasis sinyal digital yang bentuk sinyalnya terputus-putus (diskrit) dan menggunakan sistem bilangan biner. Bilangan biner tersebut akan membentuk kode-kode yang merepresentasikan suatu informasi tertentu. Komunikasi digital memiliki kelebihan dibandingkan dengan komunikasi analog, antara lain dalam meminimalisasi *noise* dan atau inteferensi. *Noise* merupakan sinyal yang tidak diharapkan dalam sistem telekomunikasi dan bersifat mengganggu serta kehadirannya tidak bisa ditentukan. *Noise* selalu ada dalam setiap sistem telekomunikasi, khususnya pada sistem transmisi. Selama proses transmisi, sinyal informasi yang ditransmisikan akan dipengaruhi oleh *noise* yang bisa mengakibatkan terjadinya *error* atau kesalahan pada penerima (*receiver*).[1]

2.1.1 Data Rate Dan Bandwidth

Sangatlah penting untuk mengidentifikasi perbedaan antara *data rate* (*d*) dan *bandwidth* (*B*) sinyal dalam sistem transmisi. Perbedaan definisi dari kedua parameter tersebut adalah sebagai berikut:

1. *Data Rate* adalah jumlah bit yang ditransmisikan tiap detik. Sebagai contohnya, *data rate* 1 Mbps berarti sistem mampu mentransmisikan data 1 Mega bit tiap detik.
2. *Bandwidth* sinyal didefinisikan sebagai lebar jalur dimana daya sinyal terkonsentrasi. Sebagai contohnya, *bandwidth* dapat didefinisikan sebagai bagian dimana 99% sinyal terkonsentrasi di bagian tersebut.

Berdasarkan definisi di atas, terlihat bahwa *bandwidth* berbanding lurus dengan *bit rate*. Jika *bit rate* tinggi, *Tb* kecil dan *bandwidth* menjadi sangat lebar. Hal ini berarti sistem komunikasi dengan *data rate* yang tinggi harus mampu menyediakan *range* frekuensi yang lebar pula.

Apabila data yang dikirimkan dalam sebuah sistem komunikasi ideal memiliki frekuensi (f) = 1 MHz dan $T = 1/f = 1/1.10^6 = 1 \mu s$, maka *bandwidth* sinyalnya adalah $4 \times 1 \text{ MHz} = 4 \text{ MHz}$, dan kecepatan data (*data rate*) nya adalah $2 \times 1 \text{ MHz} = 2 \text{ Mbps}$. Jika sebuah data memiliki frekuensi 2 MHz dan $T = 1/f = 1/2.10^6 = 0.5 \mu s$ maka *bandwidth*

sinyalnya adalah $4 \times 2 \text{ MHz} = 8 \text{ MHz}$, dan kecepatan data (*data rate*) nya adalah $2 \times 2 \text{ MHz} = 4 \text{ Mbps}$. Dengan demikian hubungan *data rate* (d) dan *bandwidth* (b) dapat dinyatakan sebagai

$$B = 4 f = 2d \quad (2.1)$$

Nyquist menyatakan bahwa bila kecepatan transmisi adalah $2B$, maka suatu sinyal dengan frekuensi tidak lebih besar daripada B , cukup memadai untuk menghasilkan kecepatan sinyal. Kebalikannya juga berlaku, suatu *bandwidth* sebesar B , maka kecepatan sinyal tertinggi yang bisa dihasilkan adalah sebesar $2B$. Keterbatasan ini dikarenakan efek *intersymbol interference*, seperti misalnya yang disebabkan oleh *delay distorsi*. Hasilnya berguna untuk pengembangan skema pengkodean digital ke analog. Jadi untuk *bandwidth* tertentu, *data rate* dapat ditingkatkan dengan cara meningkatkan jumlah elemen-elemen sinyal yang berlainan. Bagaimanapun hal ini menambah beban pada *receiver*. [1][2]

2.1.2 Jumlah Bit Error

Jumlah *bit error* merupakan jumlah bit salah yang diterima dibagi dengan jumlah bit yang dikirimkan, mengikuti ketentuan sebagai berikut:

$$\text{Jumlah Bit Error} = \frac{eb}{tb} \quad (2.2)$$

Dimana:

eb = jumlah bit yang salah (*bit error rate*)

tb = jumlah bit total yang dikirimkan

Sebagai contoh, terdapat sejumlah urutan bit yang dikirimkan, yaitu: 0 1 1 0 0 0 1 0 1 1 (sebanyak 10 bit), yang kemudian setelah melalui kanal komunikasi urutan bit yang diterima menjadi 0 0 1 0 1 0 1 0 0 1 (terjadi *bit error* sebanyak 3 bit). Dengan demikian, kemungkinan jumlah *bit error* pada contoh tersebut dapat dihitung sebagai berikut:

$$\text{Jumlah Bit Error} = \frac{3}{10} = 0,3 \text{ atau } 30\%.[5]$$

2.1.3 Kapasitas Kanal Komunikasi

Untuk data digital permasalahan yang muncul adalah gangguan kanal komunikasi yang dapat membatasi *data rate* dan *data rate* maksimum yang dapat ditransmisikan melalui suatu kanal komunikasi.

Ada empat konsep tentang kanal komunikasi, yaitu:

1. *Data rate*, merupakan jumlah data pada kanal komunikasi dalam bit per detik
2. *Bandwidth*, merupakan lebar kanal komunikasi dari sinyal yang ditransmisikan

3. *Noise*, merupakan level rata-rata derau sepanjang kanal komunikasi
4. *Error Rate*, merupakan jumlah *error* yang terjadi pada kanal komunikasi

Pernyataan Nyquist tentang *bandwidth* dapat dihubungkan dengan kapasitas kanal komunikasi yang dikemukakan oleh Claude Shannon. Untuk level derau tertentu, daya sinyal yang lebih besar akan meningkatkan kemampuan penerimaan data secara benar di dalam derau. Dalam hal ini, *signal to noise ratio* (SNR) merupakan perbandingan daya suatu sinyal terhadap daya *noise* yang muncul pada titik tertentu dalam transmisi. Biasanya, SNR diukur pada sebuah penerima, karena nantinya digunakan untuk memproses sinyal yang diterima dan menghilangkan derau yang tidak diinginkan dengan persamaan:

$$(SNR)_{dB} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_s}{P_n} \right) \quad (2.3)$$

Dimana:

P_s = *Power Signal* (daya sinyal)

P_n = *Power Noise* (daya bising)

SNR digunakan untuk menentukan batas atas terhadap jumlah data yang mampu diperoleh dari kanal komunikasi. Shannon mengemukakan bahwa kapasitas kanal komunikasi maksimum, dalam bit per detik, ditentukan dengan persamaan sebagai berikut:

$$C = B \log_2 (1 + SNR) \quad (2.4)$$

Dimana:

C = kapasitas kanal komunikasi dalam bit per detik

B = *bandwidth* kanal komunikasi dalam Hertz

Persamaan Shannon tersebut menggambarkan nilai maksimum teoritis yang dapat dicapai oleh sistem komunikasi. Sedangkan pada prakteknya, bagaimanapun juga jumlah data yang dapat ditransmisikan lebih rendah dari ketentuan Shannon tersebut. Satu alasan untuk hal ini adalah ketentuan Shannon tersebut berasumsi hanya pada *white noise* (derau suhu) saja. Batasan Shannon adalah bahwa kapasitas kanal komunikasi C tidak boleh lebih kecil dari jumlah informasi yang akan dikirimkan.

Untuk level derau tertentu, *data rate* dapat ditingkatkan, baik dengan cara meningkatkan daya sinyal atau meningkatkan *bandwidth*-nya. Bagaimanapun juga saat daya sinyal meningkat, maka akan

meningkat pula efek sifat nonlinear di dalam sistemnya, sekaligus meningkatkan derau intermodulasinya.[4]

2.2 Modulasi Digital

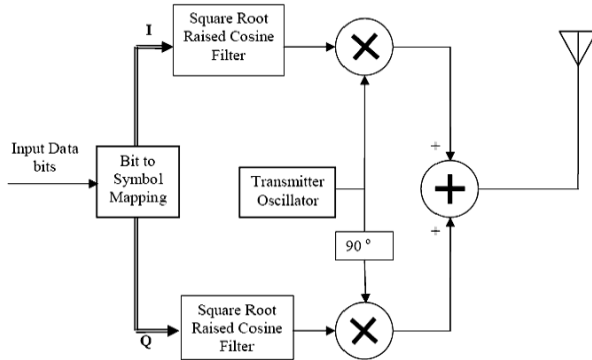
Modulasi adalah proses pengkodean informasi dari sumber pesan dengan cara transmisi yang cocok. Hal ini biasanya melibatkan menerjemahkan sinyal pesan *baseband* (disebut sumber) ke sinyal *baseband* pada frekuensi yang sangat tinggi bila dibandingkan dengan frekuensi *baseband*. Sinyal *baseband* disebut sinyal termulasi dan sinyal pesan *baseband* yang disebut sinyal modulasi. Modulasi dapat dilakukan dengan memberikan variasi amplitudo, fase, atau frekuensi pembawa, frekuensi tinggi sesuai dengan amplitudo sinyal pesan. Demodulasi adalah proses pengambilan pesan *baseband* dari operator sehingga dapat diproses dan ditafsirkan oleh penerima yang dituju (juga disebut sink). Pemilihan jenis modulasi yang digunakan ditentukan oleh penerapan yang diinginkan, termasuk juga karakteristik kanal yang digunakan seperti *bandwidth* yang tersedia dan kerentanan (*susceptibility*) kanal terhadap perubahan (*fading*).

Untuk mengirim pesan digital, sistem modulasi digital mengalokasikan waktu interval sinyal dan menghasilkan fungsi kontinyu yang mewakili simbol. Dalam modulasi digital, pesan sinyal diubah menjadi sinyal *baseband*. Pada sistem komunikasi nirkabel, bagian kedua dari modulasi adalah mengubah sinyal *baseband* ke frekuensi radio (RF) sinyal, dan memodulasi *phase*, frekuensi atau amplitudo dari sinyal pembawa (*carrier*). Sedangkan pada sistem kabel, *sinyal baseband* dapat dikirimkan secara langsung tanpa modulasi sinyal pembawa (misalnya dalam jaringan LAN).[2][5]

2.2.1 *M-ary Quadrature Amplitude Modulation (M-QAM)*

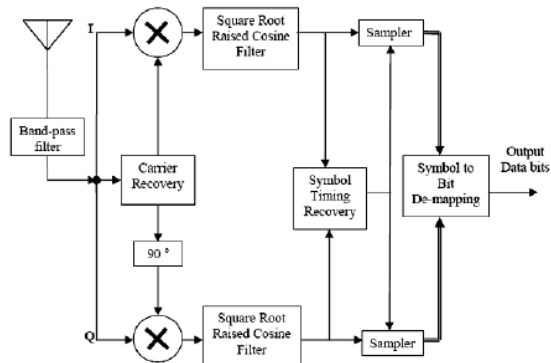
M-ary Quadrature Amplitude Modulation (M-QAM) merupakan salah satu teknik modulasi digital multi level yang saat ini banyak digunakan pada sistem komunikasi. Hal ini disebabkan karena konstelasi sinyal M-QAM yang tidak begitu rapat, bila dibandingkan dengan sistem modulasi lainnya, misalnya dengan sistem *M-ary Quadrature Phase Shift Keying (M-QPSK)*. [2][6]

Blok diagram yang menjelaskan proses modulasi M-QAM ditunjukkan pada Gambar 2.1 sebagai berikut.



Gambar 2.1 Proses Modulasi M-QAM

Sedangkan blok diagram yang menjelaskan proses demodulasi M-QAM ditunjukkan pada Gambar 2.2 sebagai berikut.



Gambar 2.2 Proses Demodulasi M-QAM

2.2.2 Penentuan Amplitudo Sinyal

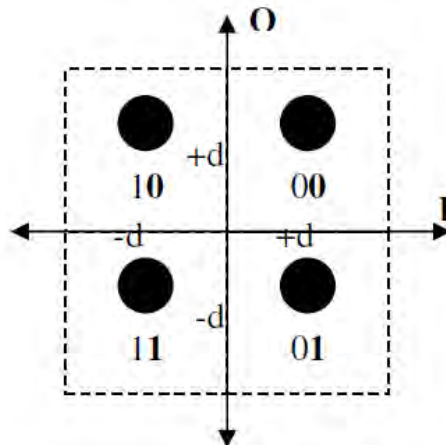
Pada proses modulasi M-QAM, aliran bit-bit pertama kali dipetakan dengan *Gray Mapping* (*Gray Coding*) ke dalam koordinat konstelasi sinyal biner *In-phase* (I) dan *Quadrature* (Q) seperti Gambar 2.1, sedangkan sebaliknya pada proses demodulasi M-QAM, aliran sinyal-sinyal analog akhirnya dikembalikan menjadi sinyal-sinyal biner dengan menggunakan *Gray Mapping*. M adalah jumlah multilevel modulasi atau jumlah maksimum data pada M-QAM dalam bentuk bit.

Untuk sistem modulasi 4-QAM dapat dikirimkan 4 data dalam biner, sedangkan untuk 64 QAM dapat dikirimkan 64 data dalam biner. Jumlah untaian biner yang dapat mempresentasikan data disebut dengan ukuran konstelasi bit, disimbolkan dengan k , dan dapat dinyatakan sebagai:[6]

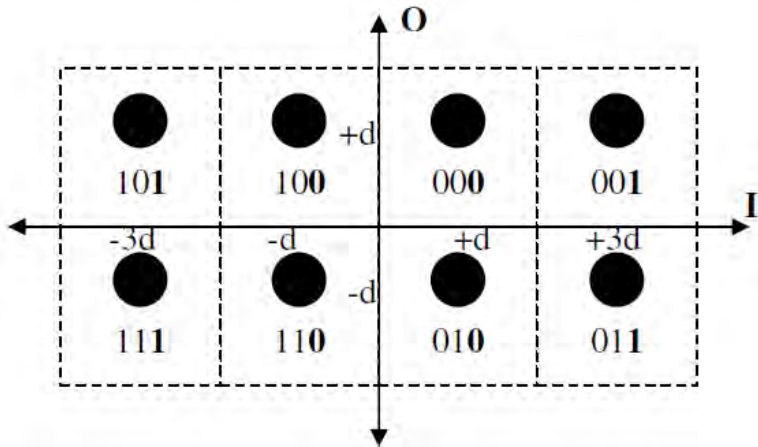
$$k = \log_2 M \quad (2.5)$$

2.2.3 Gray Mapping (Gray Coding)

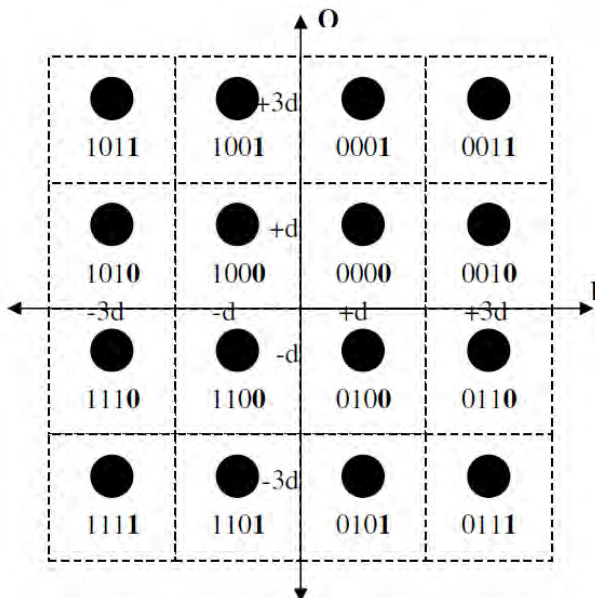
Pemetaan sinyal pada modulasi M-QAM dengan *Gray Mapping* (*Gray Coding*) dapat dilakukan dengan mengkombinasikan sisi tegak *Quadrature* (Q) dan sisi sudut *In-phase* (I) konstelasi sinyal. Angka-angka yang secara umum digunakan untuk menyatakan nilai Am_Q sebagai sisi tegak Q dan nilai Am_I sebagai sisi sudut I adalah konstanta d . Untuk modulasi 4-QAM, terdapat pasangan $(d, -d)$ dimana nilai d menyatakan bit 0 dan $-d$ menyatakan bit 1. Untuk 8-QAM pada sisi sudut I ditambahkan nilai $(-3d, +3d)$, dimana pada penambahan titik $-3d$ dan $+3d$, ditambahkan bit 1, sedangkan pada $-d$ dan $+d$, ditambahkan bit 0. Untuk 16-QAM pada sisi tegak Q dan sisi sudut I ditambahkan nilai $(-3d, +3d)$, dimana pada penambahan titik $-3d$ dan $+3d$ di sisi tegak Q ditambahkan bit 1, sedangkan pada $-d$ dan $+d$ ditambahkan bit 0. Untuk 32-QAM, pada sisi sudut I ditambahkan nilai $(-5d, +5d)$ dan $(-7d, +7d)$, sedangkan pada 64-QAM pada sisi sudut I dan sisi tegak Q ditambahkan nilai $(-5d, +5d)$ dan $(-7d, +7d)$, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.3, Gambar 2.4, Gambar 2.5, dan Gambar 2.6 sebagai berikut.



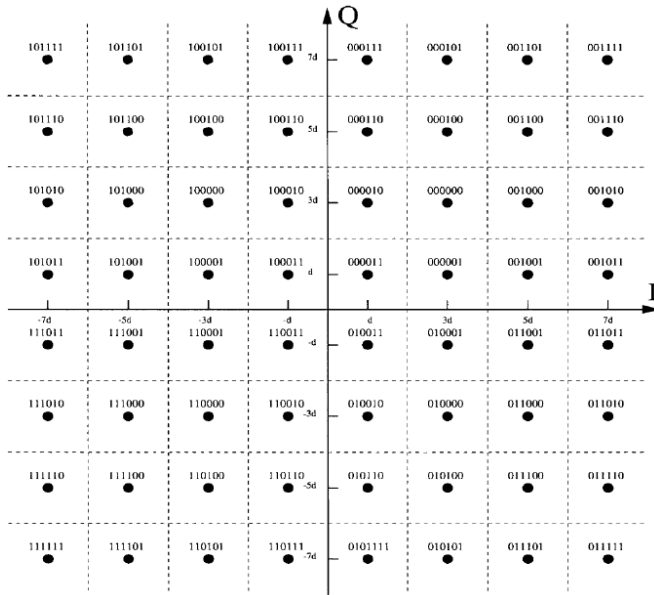
Gambar 2.3 Konstelasi sinyal 4-QAM



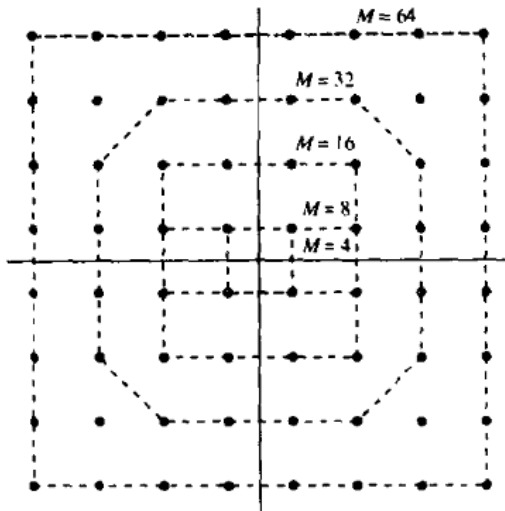
Gambar 2.4 Konstelasi sinyal 8-QAM



Gambar 2.5 Konstelasi sinyal 16-QAM



Gambar 2.6 Konstelasi sinyal 64-QAM



Gambar 2.7 Diagram ruang sinyal untuk rectangular QAM [2]

2.2.4 Probabilitas Error Pada M-QAM

Pada M-QAM sinyal hasil modulasi M-QAM dapat dinyatakan ke dalam persamaan

$$S_m(t) = A_{mc}g(t)\cos 2\pi f_c t - A_{ms}g(t)\sin 2\pi f_c t, \quad 0 \leq t \leq T \quad (2.6)$$

Dimana A_{mc} dan A_{ms} adalah amplitudo sinyal dari sinyal pembawa *quadrature* dan $g(t)$ adalah pulsa sinyal. Untuk menentukan probabilitas kesalahan (*error*) pada QAM, kita harus menetapkan sinyal ke dalam titik konstelasi. Pertama melihat sinyal 4-QAM dengan $M = 4$. Gambar 2.8 menggambarkan dua konstelasi 4-QAM. Gambar 2.8 (a) adalah empat fasa sinyal modulasi dan Gambar 2.8 (b) adalah sinyal 4-QAM dengan dua level amplitudo yaitu A_1 dan A_2 , dan empat fasa. Karena probabilitas *error* didominasi oleh jarak minimum antara titik pada konstelasi, maka dapat menentukan kondisi dengan $d_{\min}(e) = 2A$ untuk konstelasi sinyal. Dan juga menentukan nilai daya transmisi rata-rata, dengan alasan semua titik sinyal memungkinkan. Untuk 4 fasa sinyal, digunakan persamaan 2.7.

$$P_{av} = \frac{1}{4}(4)2A^2 = 2A^2 \quad (2.7)$$

Untuk dua amplitudo, empat fasa 4-QAM diletakkan titik-titik pada lingkaran. Dimana $d_{\min}(e) = 2A$ sehingga daya transmisi rata-rata sinyal adalah

$$P_{av} = \frac{1}{4}[2(3A^2) + 2A^2] = 2A^2 \quad (2.8)$$

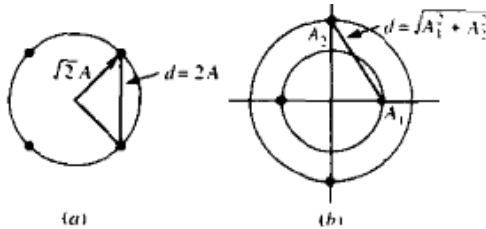
Dimana konstelasi sinyal untuk 4-QAM fasa, memiliki *error rate* yang sama untuk kedua sinyal pada Gambar 2.8.[2]

Dengan kata lain tidak ada keuntungan dari dua amplitudo sinyal 4-QAM untuk fase modulasi. Selanjutnya untuk $M=8$ QAM, pada kasus ini banyak kemungkinan konstelasi sinyal, dapat dilihat pada Gambar 2.9. dari empat gambar pada Gambar 2.9 mempunyai dua amplitudo dan memiliki jarak titik minimal dari $2A$. Dengan koordinat (A_{mc} , A_{ms}) untuk beberapa titik sinyal dinormalisasi A . Diasumsikan titik sinyal sama-sama mungkin, maka daya transmisi rata-rata sinyal dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (2.9)

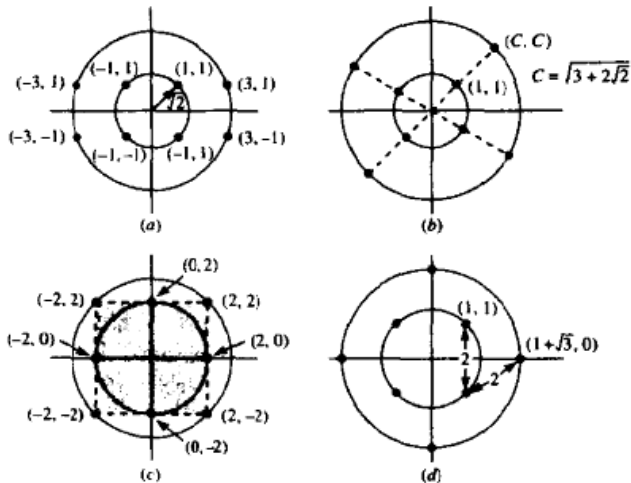
$$P_{av} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M (A_{mc}^2 + A_{ms}^2)$$

$$P_{av} = \frac{A^2}{M} \sum_{m=1}^M (a_{mc}^2 + a_{ms}^2) \quad (2.9)$$

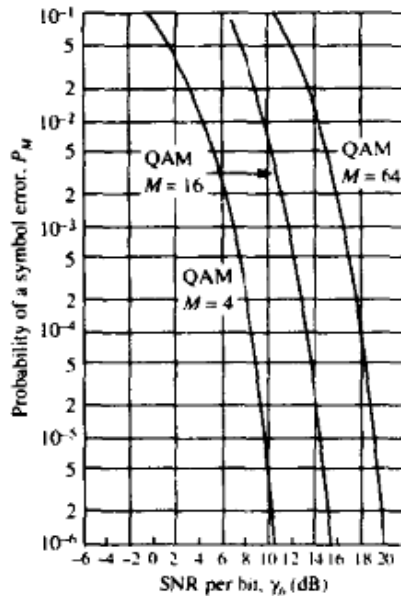
Dimana (A_{mc}, A_{ms}) adalah koordinat dari titik sinyal yang dinormalisasi A. Untuk Gambar 2.9 (a) dan (c) memiliki titik dengan bentuk rectangular dan memiliki $P_{av} = 6A^2$. Dan untuk Gambar 2.9 (b) memiliki rata-rata daya transmisi sebesar $P_{av} = 6,38A^2$ dan (d) $P_{av} = 4,73A^2$. Oleh karena itu sinyal (d) pada Gambar 2.9 membutuhkan daya kira-kira 1 dB lebih kecil dibandingkan (a) dan (b) dan 1,6 lebih sedikit dibandingkan (c) untuk mencapai probabilitas *error* yang sama.[2] Untuk grafik perbandingan probabilitas *error* untuk M-QAM dapat dilihat pada Gambar 2.10



Gambar 2.8 Dua konstelasi sinyal QAM dengan $M=4$ [2]



Gambar 2.9 Empat konstelasi sinyal untuk 8-QAM[2]



Gambar 2.10 Grafik probabilitas *error* simbol M-QAM [2]

2.3 Filter Raised Cosine

Pada saat pulsa-pulsa kotak dilewatkan melalui kanal *bandlimited*, pulsa akan menyebar dalam *domain* waktu dan pulsa untuk setiap simbol akan terdistorsi dalam *interval* waktu dari urutan simbol yang berturut-turut. Hal ini akan menimbulkan ISI (*Intersymbol Interference*) dan akan menunjukkan peningkatan probabilitas *error* pada penerima dalam mendeteksi simbol. Salah satu cara untuk meminimalisasi ISI adalah dengan meningkatkan kanal *bandwidth*. Ada beberapa teknik pembentukan pulsa yang digunakan untuk mengurangi efek ISI dan lebar spektrum dari sinyal digital termodulasi. Salah satunya adalah *filter raised cosine*.

Filter raised cosine merupakan *filter* yang paling populer yang sering digunakan dalam sistem komunikasi digital. *Filter raised cosine* masuk dalam kelompok *filter* yang memenuhi kriteria *nyquist* yang merupakan implementasi dari sebuah *filter Nyquist low-pass*. Spektrum *filter* ini menunjukkan simetri ganjil $1/2T$, dimana T merupakan periode simbol sistem.

Dalam pemrosesan sinyal, *filter root raised cosine* atau *square root raised cosine* sering digunakan sebagai filter dalam *transmit* dan

receive dalam sistem komunikasi digital untuk melakukan *matched filtering*. Hal ini membantu dalam meminimalkan ISI. Filter *root raised cosine* atau *square root raised cosine* diperoleh dari akar respon frekuensi filter *raised cosine* dinyatakan pada persamaan (2.10) atau (2.11).

$$H_{rc}(f) = H_{rrc}(f) \cdot H_{rrc}(f) \quad (2.10)$$

$$|H_{rrc}(f)| = \sqrt{|H_{rc}(f)|} \quad (2.11)$$

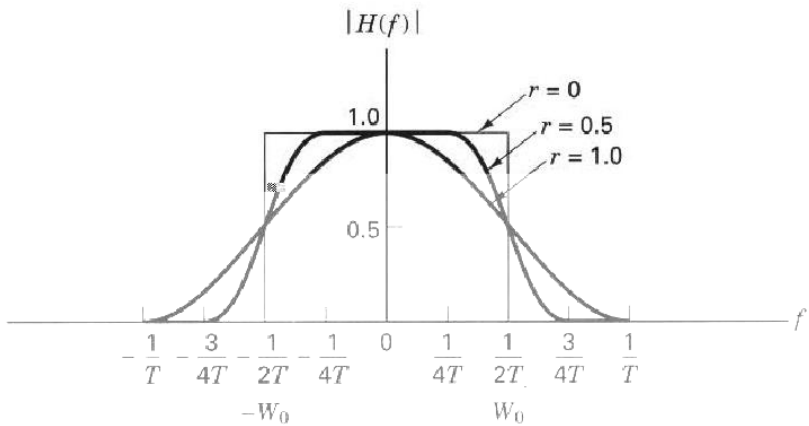
Pada sisi penerima, dilakukan proses demodulasi dan *sampling* serta deteksi untuk mendapatkan estimasi informasi yang dikirimkan. Proses demodulasi dan *sampling* bertujuan untuk mengembalikan gelombang dan mempersiapkan sinyal yang diterima untuk dideteksi.

Pada proses ini terdapat proses *matched filter* yang bertujuan untuk meningkatkan daya sinyal terhadap daya *noise* (SNR) dan proses *equalizer* untuk menurunkan ISI.

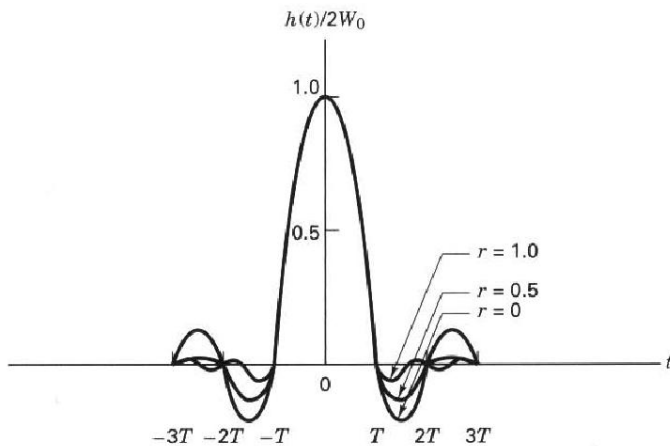
Sifat-sifat dari *Matched Filter* adalah :

1. Transformasi Fourier dari *output matched filter* yang *matched* dengan sinyal *input*, kecuali faktor *delay* waktu, sebanding dengan energy spectral density dari sinyal *input*.
2. Sinyal *output matched filter* sebanding dengan versi geseran dari fungsi otokorelasi dari sinyal *input* yang mana *filter matched* dengannya.
3. SNR *output matched filter* tergantung hanya pada rasio energi sinyal terhadap PSD dari *white noise* pada *input filter*.
4. Dua kondisi *matching* pada operasi *matched filtering* adalah
 - *Phase spectral matching* menghasilkan puncak *output* pada waktu T.
 - *Amplitudo spectral matching* memberikan SNR optimum pada harga puncak.

Proses deteksi adalah melakukan estimasi simbol yang telah dikirim berdasarkan hasil sample simbol terima, sinyal yang diterima diubah ke vektor- vektor dan sinyal yang berjarak minimum dengan sinyal terima diestimasi sebagai sinyal yang telah dikirimkan. Untuk *transfer function* sistem dan *impulse response* sistem dapat dilihat pada Gambar 2.11 dan Gambar 2.12.



Gambar 2.11 *Transfer Function Sistem*



Gambar 2. 12 *Impulse Response Sistem*

$H(f)$ = frequency transfer functoin

r = roll off factor

$h(t)$ = system impulse response

W_0 = Bandwidit Nyquist minimum untuk spektrum *rectangular*

W = Bandwidth Absolute

2.4 Teknik Estimasi BER (Bit Error Rate)

Terdapat beberapa cara untuk menentukan estimasi BER dalam simulasi komputer, diantaranya adalah :

1. Metode Monte Carlo
2. Metode Modifikasi Monte Carlo (Importance Sampling)
3. Teori Harga Ekstrem
4. Tail Extrapolation
5. Quasi-Analitical

Masing-masing metode di atas mempunyai kelebihan dan kekurangan diantaranya dibedakan oleh cara penanganan dari fungsi rapat atau distribusi peluangnya.

Metode Monte Carlo merupakan metode simulasi estimasi BER yang relatif sederhana, tetapi memerlukan waktu komputasi yang relatif lama, disebabkan oleh jumlah pengamatan yang diperlukan agar memenuhi keandalan estimasi tertentu.

2.5 Software Defined Radio (SDR)

Software Defined Radio (SDR) atau dapat disebut pula dengan *software-radio* merupakan suatu teknologi untuk membangun sistem radio yang fleksibel, *multi-service*, *multi-standard*, *multi-band*, *re-configurable* dan *re-programmable* dengan menggunakan *software*. Penggunaan SDR bertujuan untuk mengurangi penggantian *hardware* secara terus-menerus sehingga lebih menghemat biaya. Radio digunakan pada peralatan *wireless communication* dimana *software* melakukan implementasi fungsi *physical layer* dan *link layer*. Hal ini sesuai untuk peralatan *single wireless* yang kemudian diprogram ulang menggunakan modulasi yang berbeda, *coding* dan protokol akses. Fungsi utama dari *software* adalah dapat diprogram untuk standar yang ada secara fleksibel. Selain itu juga dapat di-*update* secara dinamis dengan *software* baru tanpa banyak mengubah *hardware* dan infrastruktur yang sudah ada.

Fleksibilitas dari sebuah sistem SDR terlihat dari kapabilitasnya untuk dioperasikan pada lingkungan *multiservice* tanpa terikat pada standar-standar terpisah, akan tetapi masih dapat menawarkan (secara teoritis) pelayanan-pelayanan dari beberapa sistem standar yang telah ada maupun sistem-sistem yang akan datang untuk segala *band* frekuensi.

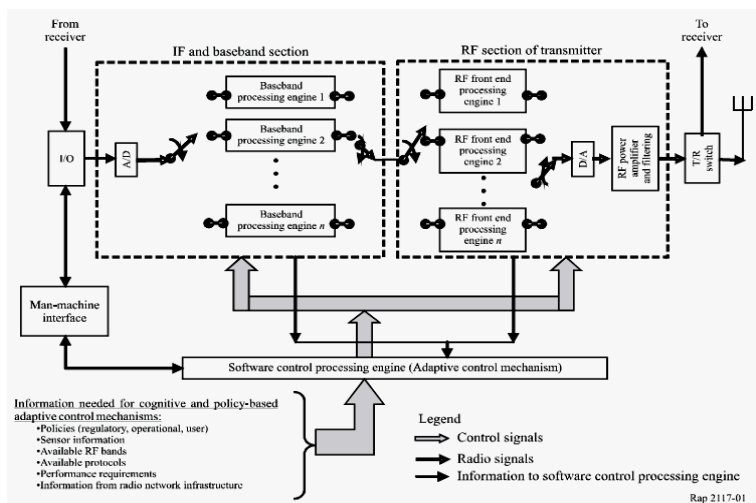
Pada perancangan SDR perlu diperhatikan dua hal yang menjadi acuan pokok yaitu:

1. Implementasi pada fungsi-fungsi *baseband*, seperti *coding*, modulasi, ekualisasi dan *pulse shaping*.

2. Sistem yang dapat diprogram ulang untuk menggaransi operasi – operasi pada *multistandard*.

Selain itu SDR juga dapat membangun suatu modem yang kompleks dengan program, *hardware* yang sudah ada dan juga komponen-komponen radio. Adapun arsitektur penyusun yang dimiliki teknologi SDR dapat dilihat pada Gambar 2.13.

Pada dasarnya arsitektur SDR terdiri atas perangkat keras untuk proses *baseband*, pengolahan sinyal, elemen yang mendukung konversi RF dan teknologi yang dipakai. Komponen yang digunakan untuk *baseband processing engine* bisa menggunakan *General Purpose Processors* (GPP), *Digital Signal Processor* (DSP), dan *Field Programmable Gate Array* (FPGA). Komponen tersebut didukung oleh *Application Programming Interface* (API) dari sistem perangkat lunak radio. Sistem yang dibangun berdasarkan standar arsitektur SDR dari ITU-R M.2117 memiliki keuntungan yaitu lebih ekonomis dari sisi perangkat keras dan perangkat lunaknya.



Gambar 2.13 Arsitektur SDR

2.6 Wireless Open Access Research Platform (WARP)

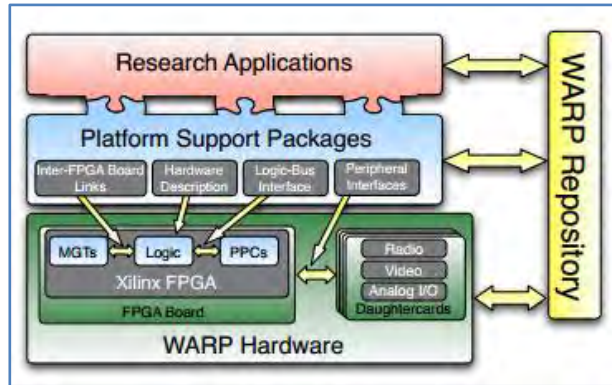
Wireless Open-Access Research Platform (WARP), merupakan sebuah modul FPGA yang telah dipersiapkan untuk melakukan proses implementasi algoritma nirkabel yang canggih. Platform ini memiliki banyak keunggulan, salah satunya adalah WARP dibuat dengan disain perangkat keras khusus, mengintegrasikan sumber daya pengolahan

berbasis FPGA dengan antar muka radio nyata. Selain itu *platform* ini didukung dengan modul khusus yang memudahkan pengguna dari berbagai pengolahan *hardware* dan sumber daya peripheral. *Platform* ini juga mendukung modul-modul digunakan untuk membangun berbagai aplikasi penelitian, termasuk implementasi *real time* dari *physical layer* dan *MAC layer*. [3][8]

2.6.1 Arsitektur *Platform* [8]

Platform ini didesain untuk memenuhi riset sistem komunikasi nirkabel dengan kinerja yang tinggi. Arsitektur *platform* ini terdiri dari empat komponen. Untuk lebih jelasnya bisa dilihat pada Gambar 2.14.

- a. *Custom Hardware* : Perangkat keras disesuaikan untuk memenuhi sistem komunikasi dengan kinerja yang tinggi. Perangkat keras ini menyediakan sumber daya untuk DSP berkecepatan tinggi yang bisa digunakan untuk implementasi algoritma yang intensif, terukur interkoneksi untuk mengalokasikan lebih banyak daya pemrosesan yang diperlukan, prosesor khusus, dan ekspansi *interface* yang lainnya.
- b. *Platform Support Packages* : Alat desain dan modul antarmuka tingkat rendah dirancang untuk memungkinkan penggunaan *hardware* oleh para peneliti di seluruh lapisan desain jaringan nirkabel.
- c. *Open-Access Repository* : Pusat penyimpanan untuk semua *source code*, model dan *file* desain *hardware*. *Content* secara lengkap akan tersedia di bawah lisensi BSD seperti *open-source*.
- d. *Research Applications* : Implementasi dari algoritma baru, diaktifkan oleh *hardware* khusus dan paket mendukung *platform*. Sistem Kendali menggabungkan algoritma baru dapat dengan cepat dibangun menggunakan bangunan standar modul blok yang disediakan dalam *repository*.



Gambar 2.14 Komponen-komponen Platform

2.6.2 Design Arsitektur WARPLab

Pada Gambar 2.15 menunjukkan jalur pemancar dan penerima dimana blok pemancar ditandai dengan warna merah muda dan blok penerima ditandai dengan warna biru.

Blok pada jalur pemancar :

- Tx I/Q Buffer: sampel *In-Phase* yang akan dikirim disimpan dalam Tx I Buffer dan sampel *Quadrature* yang akan dikirim disimpan dalam Tx Q Buffer.
- DAC I/Q: *Digital-to-Analog Converter* untuk sampel *In-Phase/Quadrature*.
- Tx BB Amplifier: *Transmitter Base Band Amplifier*. Ada dua amplifier, satu untuk sinyal *In-Phase* dan satu untuk sinyal *Quadrature*. Ini adalah *variabel Gain Amplifier* yang keduanya diatur dengan nilai penguatan yang sama, yang dapat dimasukkan oleh *user* dari *workspace* Matlab.
- Upconversion: Mengubah sinyal base band ke sinyal RF. Frekuensi *carrier* tergantung pada pengaturan PLL.
- Tx RF Amplifier: *Transmitter RF amplifier*, *Variabel Gain Amplifier*, nilai nilai penguatan yang dapat dimasukkan oleh *user* dari *workspace* Matlab.

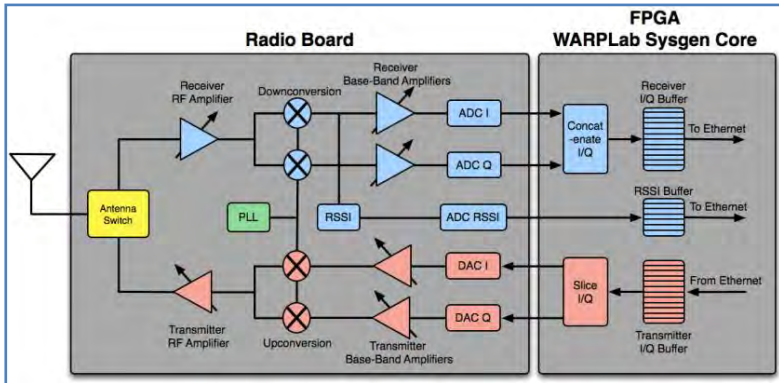
Blok pada jalur penerima:

- Rx RF Amplifier: *Receiver RF amplifier*, *variabel gain amplifier*, nilai penguatan yang dapat dimasukkan oleh *user* dari *workspace* Matlab.
- Downconversion: Mengubah sinyal RF ke basis sinyal *In-Phase/Quadrature* Band. Downconversion dari RF tergantung pada pengaturan PLL.

- c. Rx BB Amplifier: Receiver Basis Band Amplifier. Ada dua amplifier, satu untuk sinyal I dan satu untuk sinyal Q. Ini adalah *variabel Gain Amplifier* yang keduanya diatur dengan nilai penguatan yang sama, yang dapat dimasukkan oleh *user* dari *workspace* Matlab.
- d. Rx RF Amplifier: *Receiver RF amplifier*, *variabel gain amplifier*, nilai penguatan yang dapat dimasukkan oleh *user* dari *workspace* Matlab.
- e. Downconversion: Mengubah sinyal RF ke basis sinyal In-Phase/*Quadrature* Band. Downconversion dari RF tergantung pada pengaturan PLL.
- f. Rx BB Amplifier: Receiver Basis Band Amplifier. Ada dua amplifier, satu untuk sinyal I dan satu untuk sinyal Q. Ini adalah *variabel Gain Amplifier* yang keduanya diatur dengan nilai penguatan yang sama, yang dapat dimasukkan oleh *user* dari *workspace* Matlab.
- g. RSSI: *Received Signal Strength Indicator*. Blok ini mengukur RSSI tersebut.
- h. ADC I/Q: *Analog-to-Digital Converter* untuk sampel In-Phase/*Quadrature*.
- i. ADC RSSI: *Analog-to-Digital Converter* untuk pengukuran RSSI . Data RSSI tersedia di 1/4 laju data I/Q.
- j. Rx I/Q Buffer: sampel *In-Phase* yang diterima akan disimpan dalam Rx Buffer I dan sampel *Quadrature* yang diterima akan disimpan di Rx Q Buffer.
- k. RSSI Buffer: RSSI data disimpan dalam buffer ini.

Blok PLL : Pengaturan PLL menentukan frekuensi pembawa yang dapat diatur ke salah satu dari 14 kanal di Wi-Fi 2,4 GHz band atau 23 saluran di 5 GHz. Saluran pembawa dapat diatur langsung dari *workspace* Matlab.

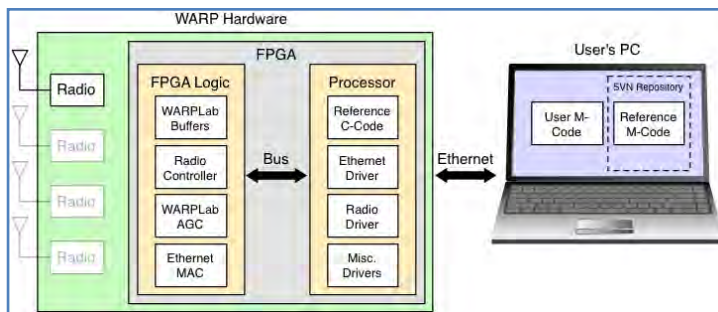
CATATAN: *Receiver RF dan BB gain* dapat diatur menggunakan *Gain Manual Control* (MGC) atau *Automatic Gain Control* (AGC). Dalam mode MGC pengguna mengambil nilai-nilai dari penguatan dan menetapkan penguatan pada modul menggunakan fungsi yang tersedia dalam Referensi WARPLab M-Code. Dalam mode AGC papan dikonfigurasi sehingga secara otomatis menetapkan penguatan penerima berdasarkan pengukuran RSSI . *Framework* WARPLab memberikan contoh yang menggambarkan bagaimana menggunakan mode MGC dan mode AGC.



Gambar 2.15 Design Arsitektur WARPLab

2.6.3 Gambaran Framework WARPLab[9]

WARPLab adalah *framework* yang bisa menggabungkan WARP dan Matlab. Dengan WARPLab, dapat berinteraksi dengan *node* WARP langsung dari *workspace* Matlab dan sinyal yang dihasilkan dalam MATLAB dapat ditransmisikan secara *real-time* melalui udara (*over-the-air*) menggunakan *node* WARP. Setup WARPLab ditunjukkan pada Gambar 2.16.



Gambar 2.16 Setup WARPLab

WARPLab sangat fleksibel, mendukung kombinasi dari perangkat keras WARP v1, v2, atau v3. Selain itu juga mendukung sejumlah radio pada setiap *board* WARP. Desain untuk PHY baru adalah sebagai berikut:

- a. Pengguna membuat dalam Matlab, sampel yang akan dikirim adalah bagian dari *custom* PHY.

- b. Sampel yang akan dikirim akan didownload ke *buffer* di *node* yang digunakan sebagai pemancar.
- c. Pengguna mengirimkan *trigger* untuk *node transmitter* dan *receiver*. Setelah penerimaan *trigger* ini, sampel dikirim *over-the-air* dan di-*capture* secara *real-time*.
- d. Pengguna membaca sampel yang ter-*capture* diambil dari *node* penerima dengan *workspace* Matlab.
- e. Sampel yang diterima diproses secara *offline* di Matlab

2.6.4 Spesifikasi WARPLab[8]

Tx/Rx I/Q Buffers

- a. Tx/Rx I/Q Buffers yang *independent*
- b. Setiap *buffer* dapat menyimpan maksimum 2^{14} sampel
- c. Frekuensi sampling yang digunakan adalah 40 MHz

Syarat Sinyal yang dipancarkan :

- a. Amplitudo pada bagian real (*In-Phase Signal : I*) adalah $[-1,1]$ dan amplitudo pada bagian imajiner (*Quadrature Signal : Q*) adalah $[-1,1]$. Sinyal I/Q pada pemancar terwakili dalam FPGA menggunakan 15-16 titik tetap.
- b. Frekuensi terendah : 30 KHz (*Radio Filter DC*)
- c. Frekuensi tertinggi : bergantung pada pengaturan frekuensi pada *Tx/Rx Low Pass Filter* (LPF). Secara default, Tx dan Rx LPF diatur oleh *nominal mode*. Adapun pengaturannya adalah sebagai berikut:

LPF pada pemancar

- 1) Mode 0 : Undefined
- 2) Mode 1 : 12 MHz (*Nominal Mode*)
- 3) Mode 2 : 18 MHz (*Turbo Mode 1*)
- 4) Mode 3 : 24 MHz (*Turbo Mode 2*)

LPF pada penerima

- 1) Mode 0 : 7.5 MHz
- 2) Mode 1 : 9.5 MHz (*Nominal Mode*)
- 3) Mode 2 : 14 MHz (*Turbo Mode 1*)
- 4) Mode 3 : 18 MHz (*Turbo Mode 2*)

I/Q ADC/DAC

- a. Clock selalu pada 40 MHz
- b. Masukan sinyal DAC I/Q direpresentasikan menggunakan titik tetap 16_15

- c. Masukan sinyal ADC I/Q direpresentasikan menggunakan titik tetap 14_13

Tx/Rx Amplifiers

- a. Tx RF PA : 30 dB
- b. Tx BB : 0-3 dB
- c. Tx RF : 0-63 dB
- d. Rx BB : 0-31 dB
- e. Rx RF : 0-63 dB

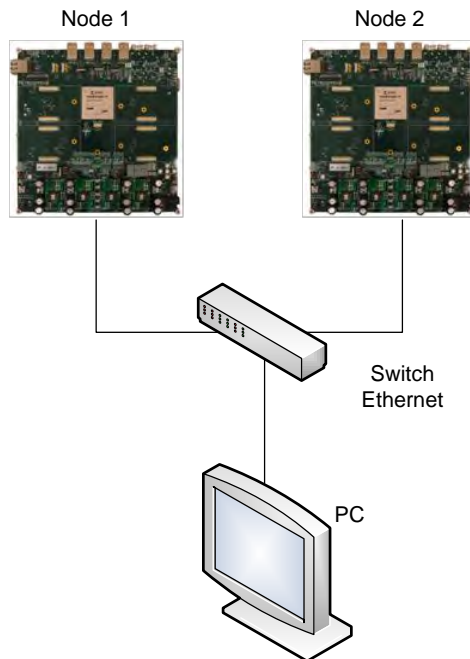
Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB III METODE PENELITIAN

Pada pengerjaan tugas akhir ini terdapat beberapa langkah yang dilakukan dalam pengerjaannya yaitu mengintegrasikan PC dengan WARP, memodelkan sistem komunikasi SISO dengan teknik modulasi M-QAM, dan menerapkan pemodelan menggunakan program MATLAB untuk pengolahan data sebelum dikirim dan setelah diterima secara. Langkah-langkah pengerjaan dapat dilihat pada Bab I, Gambar 1.1.

3.1 Integrasi PC dengan modul WARP

Pada penelitian ini menggunakan dua modul WARP versi 2 yaitu *node 1* dan *node 2*, proses integrasi WARP dengan PC menggunakan *switch ethernet* dan kabel LAN, seperti dapat dilihat pada Gambar 3.1



Gambar 3.1 Konfigurasi sistem komunikasi SISO dengan WARP

Pada pengerjaan tugas akhir ini digunakan WARPLab versi 7.1, WARP ini akan diintegrasikan dengan PC. WARPLab digunakan agar sinyal yang dibangkitkan melalui program Matlab bisa dikirimkan antar modul WARP secara *real time*. Langkah-langkah dalam proses integrasi PC dengan WARP versi 2 sebagai berikut :

1. Menghubungkan PC dengan WARP dengan menggunakan *switch ethernet* menggunakan kabel LAN seperti pada Gambar 3.1.
2. Mengatur IP pada PC dan warplab_defines pada program Matlab (IP yang digunakan harus sama antara PC dan Matlab).
3. Mengatur *routing ARP* pada *Command Prompt* dengan *run as administrator*.
4. Mengatur nomor IP pada WARP menjadi 10.0.0.1 untuk *node 1* (pengirim) dan 10.0.0.2 untuk *node 2* (penerima).

Pengaturan dilakukan dengan cara mengatur *dipswitch* seperti Gambar 3.2.

```

Command Window

Select from the following available transports:
[1] (default) Java UDF
Selection:
    setting to java

-----
Enable jumbo frame support? (experimental)
[1] (default) false
[2]         true
Selection:
    setting to false

-----

Setup Complete
wl_ver():
WARPLab v7.1.0
>> wl_initNodes(2)

ans =

Displaying properties of 2 wl_node objects:
| ID | WLMVER | HWVER | Serial # | Ethernet MAC Addr | Address |
|----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 0 | 7.1.0 | 2 | N/A | 00-50-C2-63-30-00 | 10.0.0.1 |
| 1 | 7.1.0 | 2 | N/A | 00-50-C2-63-30-01 | 10.0.0.2 |

```

Gambar 3.2 Indikator keberhasilan Integrasi PC dengan WARP

3.2 Pemodelan Sistem Komunikasi SISO dengan Teknik Modulasi M-QAM

Pemodelan sistem komunikasi SISO meliputi pemodelan perangkat WARP seperti pada Gambar 3.1 dan pemodelan dilakukan pada program dengan menggunakan Matlab. Proses implementasi sistem komunikasi SISO dengan teknik modulasi M-QAM pada WARP menggunakan beberapa parameter yang telah diatur sebelumnya pada program Matlab. Parameter-parameter tersebut terdapat pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Parameter Sistem Komunikasi SISO dengan Teknik Modulasi M-QAM

No	Parameter	Nilai
1	<i>Filter</i>	Squared Root Raised Cosine
2	<i>Filter Order</i>	64
3	Roll Factor	0.9
4	Jumlah Preamble	13
5	Jumlah corr window	300
6	Jumlah delay	400
7	Frekuensi <i>Upconvert</i>	5 MHz
8	Frekuensi Sampling	40 MHz
9	Carrier channel	Disesuaikan
10	Transmitter <i>baseband</i> gain	1
11	Transmitter RF gain	0-31 dB
12	Receiver <i>baseband</i> gain	1
13	Receiver RF gain	1

Proses kerja sistem komunikasi SISO pada WARP dapat digambarkan pada blok diagram pada Gambar 3.3

Sistem Komunikasi SISO dengan modulasi M-QAM dimulai dengan membangkitkan data informasi berupa bit acak biner, misal deretan bit $u_i = [(1)(2)...u(n)]$ dengan n adalah banyak bit yang dibangkitkan. Kemudian, bit acak biner dibentuk menjadi deretan simbol simbol dengan menggunakan rumus pada persamaan (3.1)

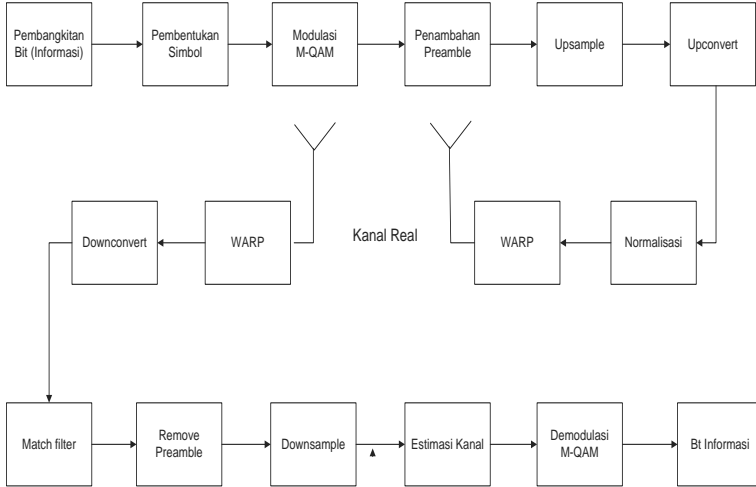
$$v = \sum_{i=1}^k u(i)2^{k-1} \quad (3.1)$$

dengan $k = \log_2 M$ dan M adalah level modulasi.

Simbol *integer* akan diolah sebagai *input* untuk proses modulasi. Simbol integer akan diubah menjadi bilangan kompleks yang sesuai dengan jenis teknik modulasi yang digunakan, seperti terlihat pada gambar konstelasi pada BAB II. Hasil proses modulasi berupa simbol

kompleks yang memiliki nilai real dan imajiner. Deretan simbol hasil modulasi seperti persamaan (3.2)

$$\mathbf{v}_m = [v_1 \ v_2 \ v_3 \ \dots \ v_{(n/k)}] \quad (3.2)$$



Gambar 3.3 Blok Diagram Sistem Komunikasi SISO dengan Teknik Modulasi M-QAM

Kemudian, ditambahkan simbol pilot yang digunakan untuk respon estimasi kanal. Deretan simbol tersebut kemudian ditambahkan deretan *preamble* untuk menentukan letak simbol informasi pertama yang diterima di penerima.

Proses selanjutnya adalah *upsample*. *Upsample* bertujuan untuk meningkatkan *sampling rate* dari data yang dikirim. Proses ini dilakukan dengan melewati ke *filter Squared Root Raised Cosine* (SRRC). Respon dari *filter raised cosine* adalah:

$$RC(t) = \text{sinc}\left(\frac{1}{T}\right) \frac{\cos \frac{\alpha \pi t}{T}}{1 - \left(\frac{2\alpha t}{T}\right)^2} \quad (3.3)$$

dengan nilai α adalah nilai *roll-off factor*, α memiliki nilai sebesar $0 \leq \alpha < 1$.

Proses berikutnya adalah *upconvert* yaitu melakukan konversi sinyal ke frekuensi yang lebih tinggi dengan menggeser frekuensi tengah sinyal *baseband* ke frekuensi yang lebih tinggi. Pada pengerjaan tugas akhir ini frekuensi yang digunakan sebesar 5 MHz. Proses *upconvert* dilakukan untuk menghindari pelemahan dari radio DC. Proses

upconvert dilakukan dengan mengalikan sinyal terhadap frekuensi sinusoida kompleks, yaitu

$$\exp(j\sqrt{-1} \times 2\pi f_c t) \quad (3.4)$$

dengan f_c adalah frekuensi *sampling*, t adalah waktu.

Sebelum proses pengiriman melalui WARP, sinyal yang akan dikirim dinormalisasi untuk mengoptimalkan DAC yang terdapat pada perangkat WARP. Pengoptimalan DAC pada nilai dengan range -1 sampai +1. Proses normalisasi dengan cara menentukan nilai skala, kemudian nilai skala tersebut dikalikan dengan sinyal hasil *upconvert*.

$$\text{skala} = \frac{1}{\max \text{ real dan imajiner sinyal hasil upconvert}} \quad (3.5)$$

Langkah berikutnya sinyal tersebut dikirimkan ke *buffer transmitter* melalui *switch ethernet*. Proses pengiriman akan berlangsung setelah dikirimkan paket sinkronisasi dari pengirim (*transmitter*) ke penerima (*receiver*). Proses yang ada di penerima merupakan kebalikan dari yang ada di pengirim, dimulai dengan proses *downconvert*. Pada proses ini, dilakukan pengalihan sinyal dengan konjugat dari frekuensi *upconvert* yaitu

$$\exp(-j\sqrt{-1} \times 2\pi f_c t) \quad (3.6)$$

dengan f_c adalah frekuensi *sampling* dan t adalah waktu.

Proses selanjutnya adalah *matched filtering*, frekuensi tinggi yang dihasilkan dari proses *downconvert* akan dihilangkan dengan *matched filtering* agar sesuai dengan bentuk pulsa *raised cosine* di sisi pengirim. Setelah proses *matched filtering*, dilakukan proses pendeteksian simbol pertama menggunakan *preamble*. Proses deteksi simbol pertama dilakukan berdasarkan korelasi tertinggi antara *sample* sinyal yang diterima dengan *sample preamble*. Proses *downsample* dilakukan setelah didapat posisi *preamble* berdasarkan nilai korelasi tertinggi. Sinyal di-*downsample* dengan jumlah *sample* saat *upsample*. Proses selanjutnya adalah deteksi simbol, proses deteksi simbol dilakukan dengan estimasi kanal yang dilakukan dengan metode pilot. Skema estimasi kanal yaitu di sisi pengirim, deretan simbol informasi disisipkan sebuah simbol pilot (*estimator*) yang diletakkan secara periodik.

Pada sisi penerima, nilai simbol yang diterima dikalikan dengan nilai skala yang sama di sisi pengirim. Nilai simbol diketahui sebagai hasil kali dengan *estimator* karena asumsi tipe kanal yang *flat fading*. Proses perbaikan fase dan amplitudo dapat dilakukan dengan perkalian simbol dengan konjugat estimasi kanal kemudian dibagi dengan kuadrat nilai mutlak dari estimasi kanal. Deretan simbol selanjutnya

didemodulasi untuk mendapatkan nilai simbol dalam integer. Simbol yang dihasilkan dari proses demodulasi diubah menjadi deretan bit dengan menggunakan cara merubah simbol integer ke bit. Setelah itu BER dapat dihitung dengan membandingkan deretan bit yang di kirim dengan deretan bit yang di terima.

3.3 Metode Pengukuran

Pengukuran dilakukan di dua kondisi lingkungan yang berbeda yaitu di dalam ruangan (*indoor*) yang dilakukan di ruang B304 Laboratorium Telekomunikasi Multimedia Jurusan Teknik Elektro dengan kondisi LOS dan NLOS. Dan di luar ruangan (*outdoor*) di tempat parkir dosen Jurusan Teknik Elektro dengan kondisi LOS dan NLOS. Tujuan pengukuran dilakukan di lingkungan yang berbeda agar didapat hasil dengan kondisi lingkungan yang berbeda, dengan banyak benda yang mempengaruhi maka *multipath fading* akan berbeda juga.

3.3.1 Pengukuran Lingkungan *Indoor*

Pengukuran lingkungan *indoor* dilakukan di ruang B304 Laboratorium Telekomunikasi Multimedia Jurusan Teknik Elektro. Jarak antara *node* pengirim dan penerima disesuaikan. Pengukuran pada lingkungan *indoor* untuk kondisi LOS dan NLOS ditunjukkan pada Gambar 3.4 dan Gambar 3.5.

3.3.2 Pengukuran Lingkungan *Outdoor*

Pengukuran lingkungan *outdoor* dilakukan di tempat parkir dosen Jurusan Teknik Elektro. Jarak antara *node* pengirim dan penerima adalah 6 meter. Pengukuran pada lingkungan *outdoor* ditunjukkan pada Gambar 3.6 dan Gambar 3.7.

3.3.3 Metode Perhitungan *Bit Error Rate (BER)*

Saat *output* diperoleh, kinerja sistem dapat diukur menggunakan parameter BER. BER merupakan perbandingan antara total bit yang salah dengan total bit yang dikirim. BER dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$BER = \frac{\text{Jumlah bit yang salah}}{\text{Jumlah bit yang dikirim}} \quad (3.7)$$



Gambar 3.4 Pengukuran pada Lingkungan *Indoor* untuk kondisi LOS



Gambar 3.5 Pengukuran pada Lingkungan *Indoor* untuk kondisi NLOS



Gambar 3.6 Pengukuran pada Lingkungan *Outdoor* untuk kondisi LOS



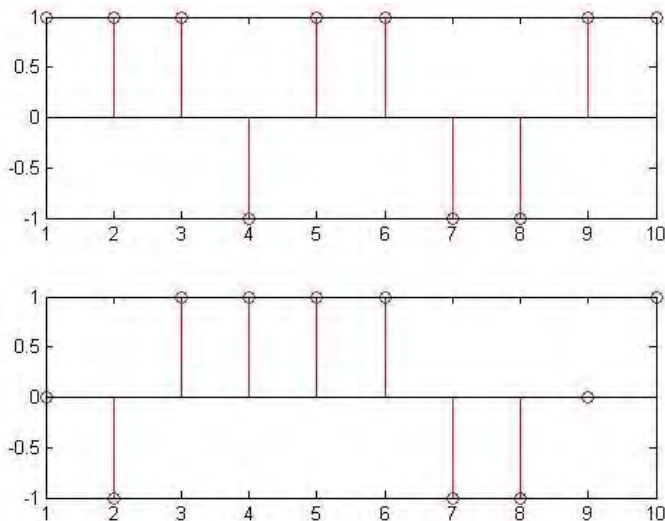
Gambar 3.7 Pengukuran pada Lingkungan *Outdoor* untuk kondisi NLOS

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

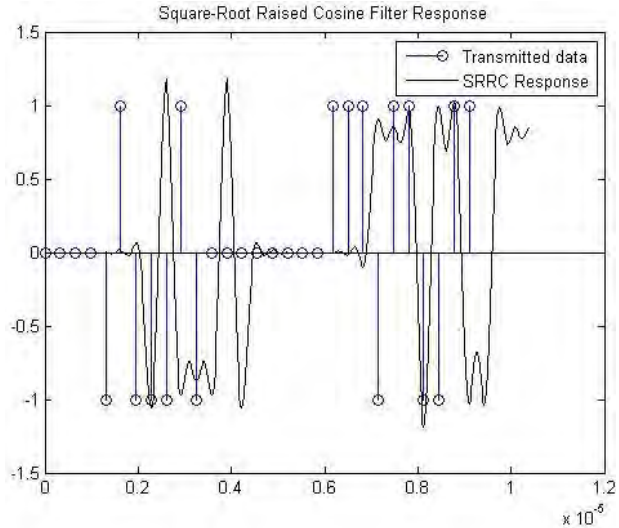
Pada bab ini akan dilakukan analisa kinerja sistem komunikasi SISO dengan teknik modulasi M-QAM dengan membandingkan *Bit Error Rate* (BER) pada lingkungan *indoor* dan *outdoor*.

4.1 Proses Sistem Komunikasi SISO dengan Teknik Modulasi M-QAM

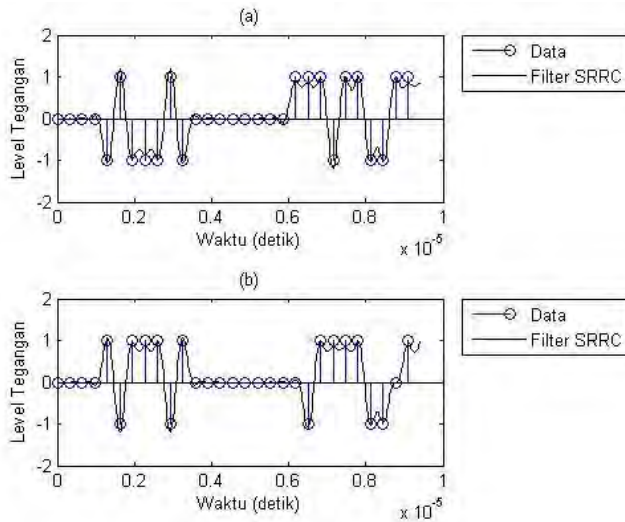
Informasi yang akan dikirimkan pada implementasi sistem komunikasi SISO dengan teknik modulasi M-QAM melalui beberapa tahap, seperti yang telah digambarkan pada diagram blok pada Gambar 3.3. Pertama, membangkitkan data informasi berupa bit acak biner. Kemudian, data tersebut membentuk simbol lalu dilakukan proses modulasi. Selanjutnya, hasil modulasi ditambahkan simbol pilot dan *preamble*. Hasil pembangkitan bit, pemetaan simbol dan proses modulasi serta penambahan simbol pilot dan *preamble* ditunjukkan pada Gambar 4.1 dan Gambar 4.2 secara berurutan. .



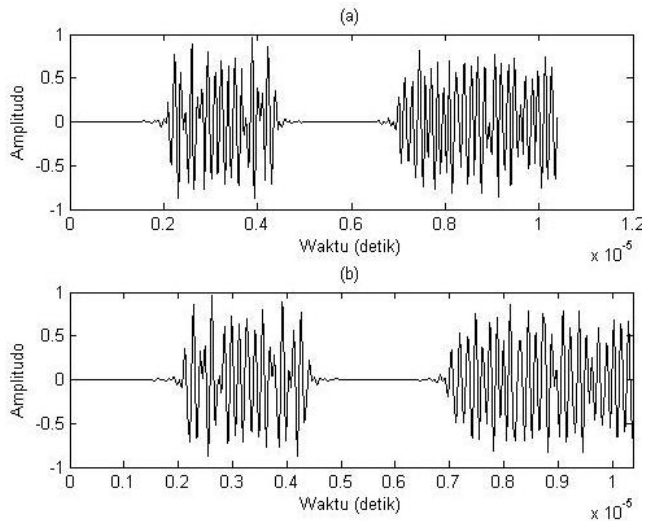
Gambar 4.1 Data yang dikirim dalam bentuk bit



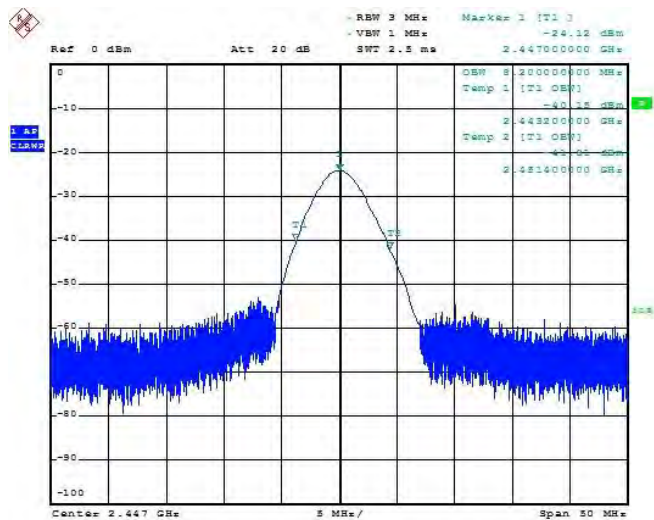
Gambar 4.3 Data yang dikirim dalam bentuk simbol melewati filter raised cosine



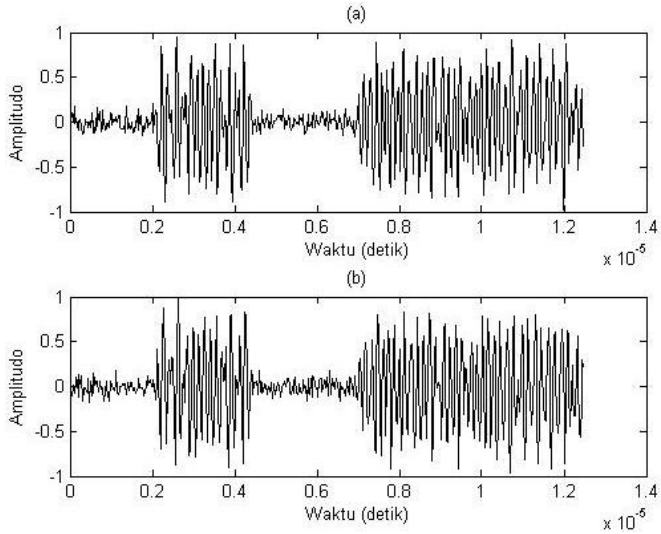
Gambar 4.4 Hasil *filter* SRRC pada simbol (a) inphase dan (b) *quadrature*



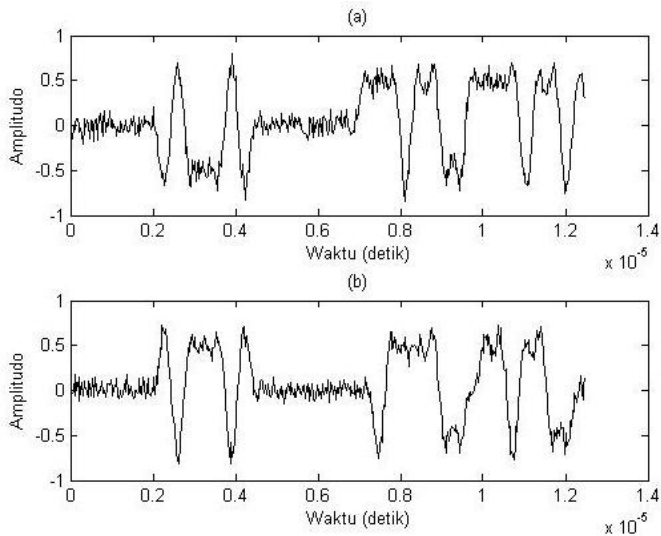
Gambar 4.5 Hasil *upconvert* (a) inphase dan (b) *quadrature baseband*



Gambar 4.6 Spektrum sinyal sebelum ditransmisikan



Gambar 4.7 Sinyal (a) inphase dan (b) *quadrature* pada penerima

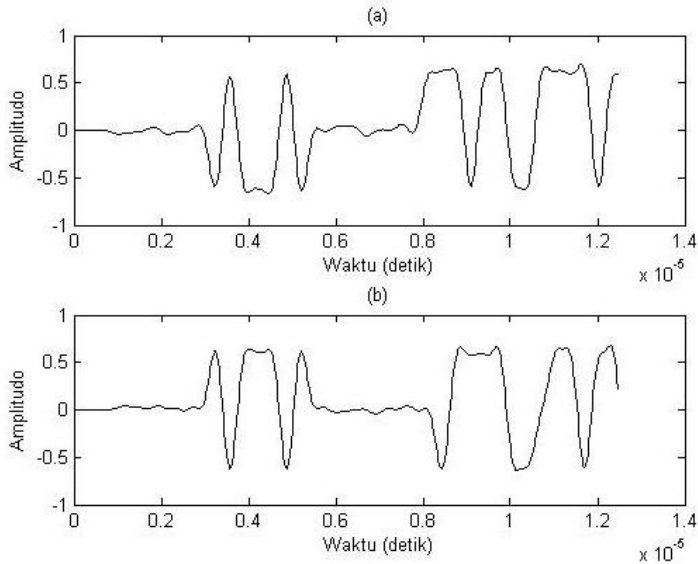


Gambar 4.8 Sinyal (a) in-phase dan (b) *quadrature* setelah proses *downconvert* pada penerima

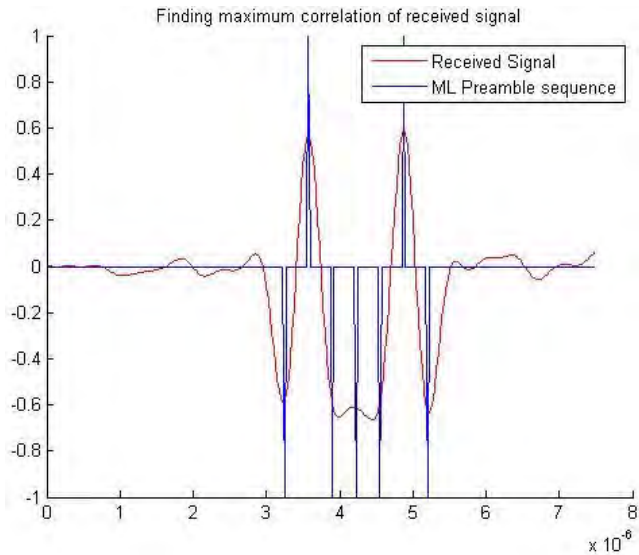
Selanjutnya dilakukan proses *matched filtering*, proses *matched filtering* akan menghilangkan elemen frekuensi tinggi sebelum melakukan proses deteksi *preamble* dan simbol. Bentuk sinyal serta spektrumnya setelah proses *matched filtering* dapat dilihat pada Gambar 4.9. Pada pengamatan sinyal pada gambar 4.9, terjadi pergeseran sinyal. Hal ini disebabkan oleh *delay* yang terdapat pada proses *filtering*.

Kemudian dilakukan proses pendeteksian simbol pertama menggunakan *preamble*. Pendeteksian simbol pertama dilakukan berdasarkan korelasi tertinggi terhadap *preamble*. Hasil proses pendeteksian *preamble* dapat dilihat pada Gambar 4.10.

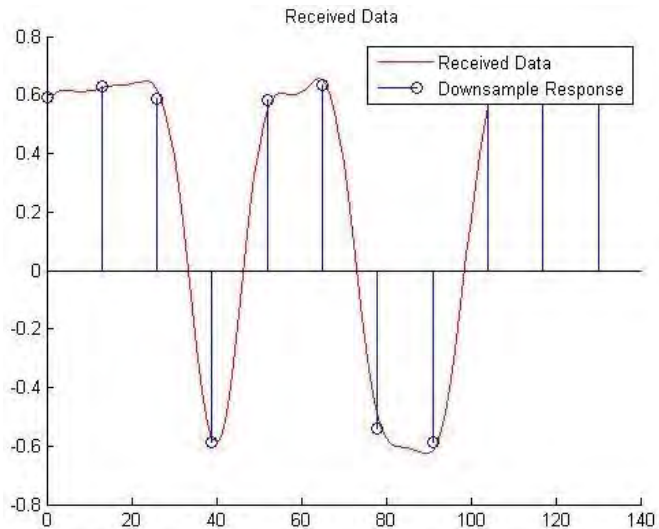
Selanjutnya proses *downsample* dilakukan setelah didapat posisi *preamble* berdasarkan nilai korelasi tertinggi. Sinyal *downsample* dengan jumlah *sample* saat *upsample*. Hasil *downsample* ditunjukkan pada Gambar 4.11



Gambar 4.9 Sinyal (a) inphase dan (b) *quadrature* setelah *matched filtering*



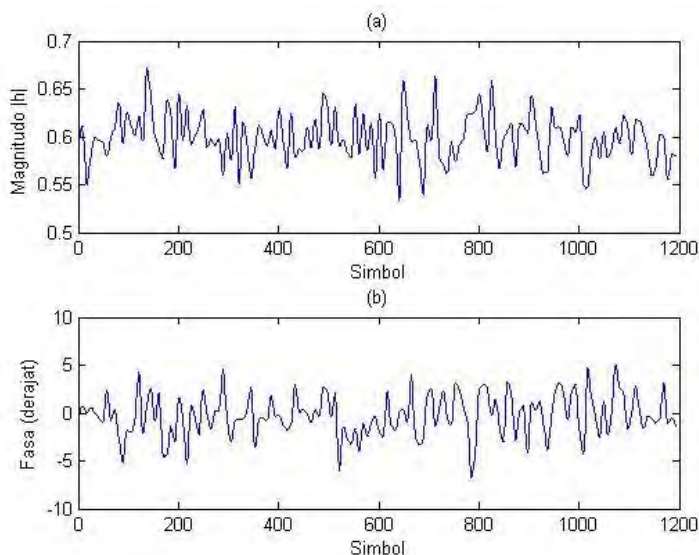
Gambar 4.10 Nilai korelasi tertinggi sinyal yang diterima



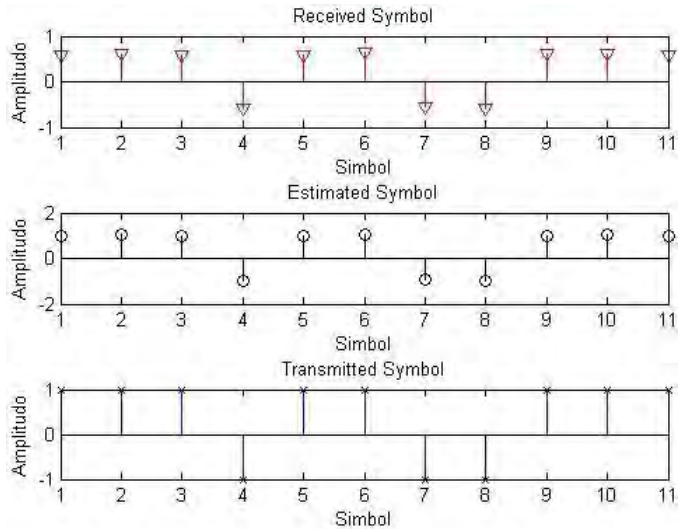
Gambar 4.11 Sample sinyal pertama yang diterima dan setelah downsample

Setelah proses *downsample* selanjutnya proses estimasi kanal dilakukan berdasarkan estimator yang diletakan secara periodik pada awal proses transmisi simbol. Estimasi respon magnitudo dan fasa kanal dapat terlihat pada gambar 4.12. Pada gambar 4.12 dapat dilihat bahwa terdapat variasi pada fasa kanal dan magnitudo sinyal. Pada estimasi fasa kanal, dapat diasumsikan bahwa fasa merupakan fungsi linear. Sedangkan pada magnitudo sinyal, terdapat variasi amplitudo untuk masing-masing simbol yang diterima.

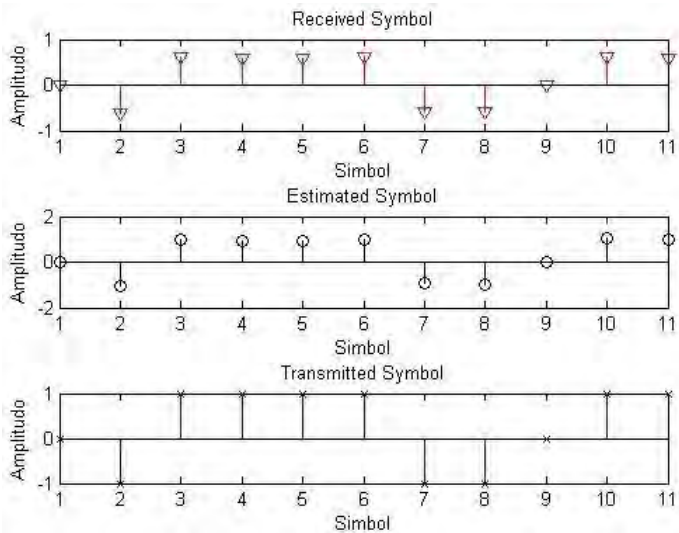
Pada Gambar 4.13 dan Gambar 4.14 dapat dilihat perbandingan antara simbol yang diterima, simbol hasil estimasi dengan simbol yang dikirim. Pada gambar hasil perbandingan simbol dapat diamati bahwa simbol-simbol yang diterima mengalami pergeseran fasa. Pada proses deteksi simbol, tanpa melakukan perbaikan fasa bisa dilihat simbol akan mengalami kesalahan deteksi. Perbandingan ini penting untuk mengetahui bahwa simbol yang dikirimkan benar dengan metode *phase recovery* yang tepat.



Gambar 4.12 Estimasi (a) magnitudo kanal dan (b) fasa kanal SISO dengan teknik modulasi M-QAM

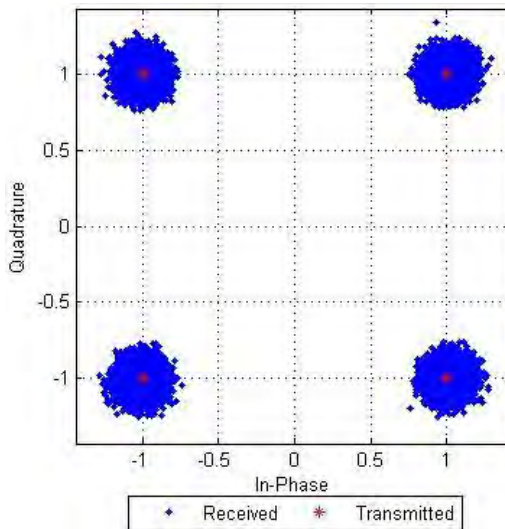


Gambar 4.13 Perbandingan Simbol In-Phase

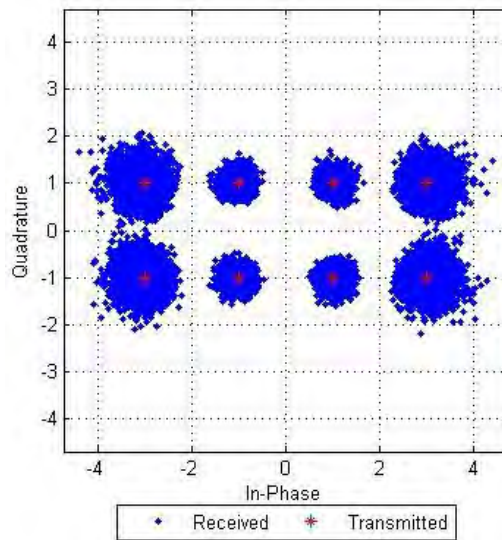


Gambar 4. 14 Perbandingan Simbol *Quadrature*

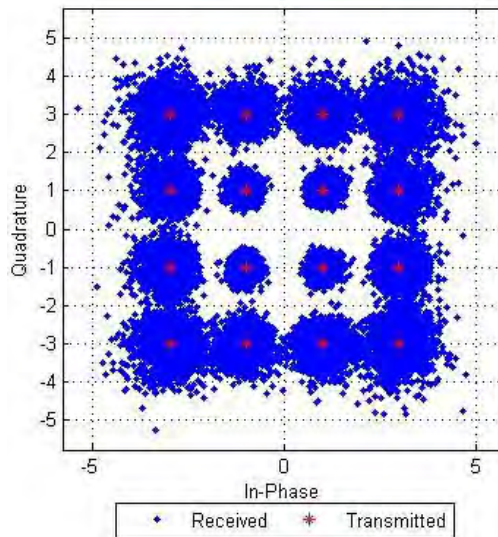
Selanjutnya analisa simbol yang diterima dilakukan dengan menggunakan *scatterplot* untuk menentukan wilayah deteksi simbol pada sistem komunikasi M-QAM. Simbol yang diamati telah melewati proses estimasi kanal dan perbaikan fasa. Konstelasi simbol untuk 4-QAM, 8-QAM, 16-QAM, 32-QAM, dan 64-QAM dapat dilihat secara berurutan pada Gambar 4.15, Gambar 4.16, Gambar 4.17, Gambar 4.18, Gambar 4.19. Pada konstelasi simbol yang diterima, simbol yang dideteksi untuk 4-QAM, 8-QAM dan 16-QAM mendekati simbol yang diterima. Sedangkan untuk 32-QAM dan 64-QAM terlihat simbol yang diterima lebih rapat karena jarak titik konstelasi yang semakin kecil, yang mengakibatkan terjadinya *bit error* yang lebih besar. Untuk konstelasi 8-QAM, 16-QAM dan 32-QAM, simbol yang diterima di titik terluar konstelasi mengalami penyebaran simbol yang paling besar pada penerima. Ini disebabkan karena perbedaan amplitudo, titik konstelasi yang berada pada titik paling luar mempunyai amplitudo yang lebih besar jika dibandingkan dengan titik konstelasi bagian dalam. Hal ini dikarenakan amplitudo yang besar membutuhkan daya yang besar, sedangkan E_b/N_0 yang dikirimkan untuk semua titik konstelasi bernilai sama. Karena untuk titik konstelasi bagian luar membutuhkan daya yang besar maka konstelasi yang diterima terjadi penyebaran yang lebih besar jika dibandingkan dengan titik konstelasi bagian dalam.



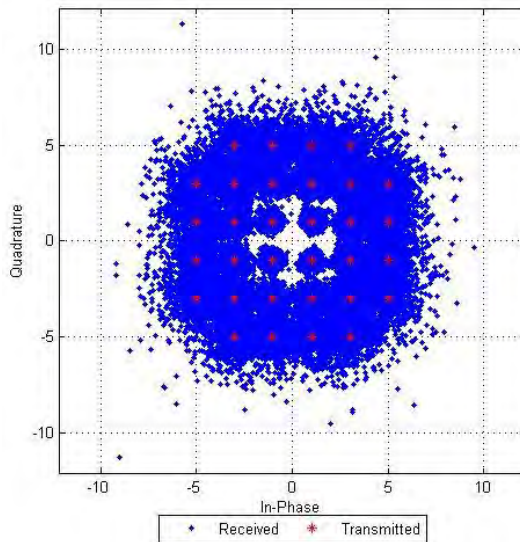
Gambar 4.15 Konstelasi simbol 4-QAM pada penerima



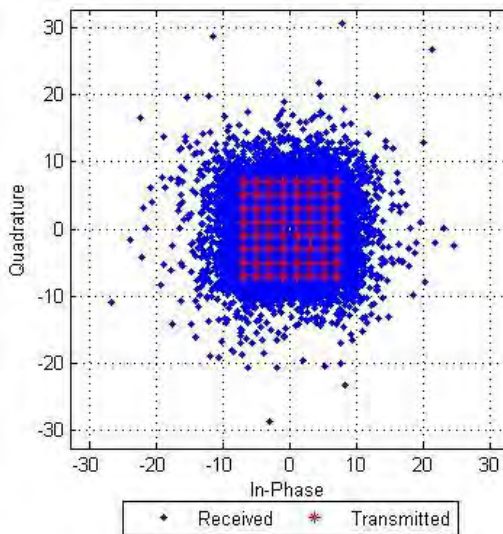
Gambar 4.16 Konstelasi simbol 8-QAM pada penerima



Gambar 4.17 Konstelasi simbol 16-QAM pada penerima



Gambar 4.18 Konstelasi simbol 32-QAM pada penerima



Gambar 4.19 Konstelasi simbol 64-QAM pada penerima

4.2 Analisa Hasil Pengukuran dengan Teknik Modulasi M-QAM (*Indoor*)

Pengukuran *indoor* dengan teknik modulasi M-QAM dilakukan dengan mengubah jarak antar *node* pengirim dan penerima dengan jarak 4 meter, 5 meter dan 6 meter. Jumlah bit yang dikirim adalah 120000 bit. Nilai Tx_BB = 1, Tx_Rf = 60 dengan step 4, Rx_BB = 1, dan Rx_Rf = 1.

4.2.1 Kondisi *Line of Sight* (LOS)

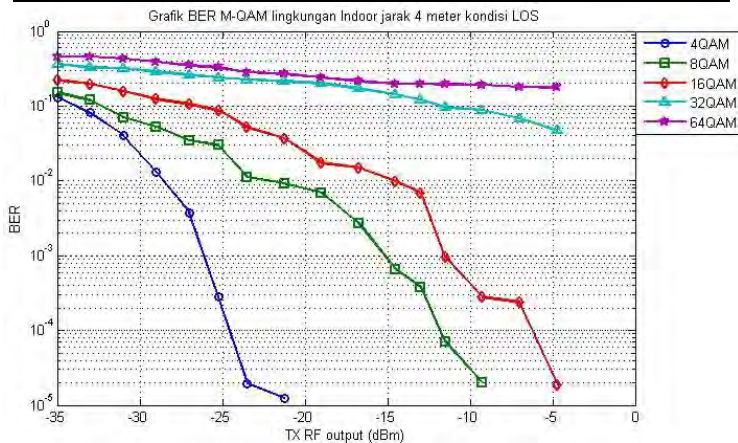
Berdasarkan data hasil pengukuran pada Tabel 4.1, Tabel 4.2 dan Tabel 4.3 maka diperoleh grafik BER untuk jarak 4 meter, 5 meter dan 6 meter pada kondisi *line of sight* (LOS) di lingkungan *indoor* yang ditunjukkan secara berutan pada Gambar 4.20, Gambar 4.21 dan Gambar 4.22.

Tabel 4. 1 Data Hasil pengukuran *Indoor* untuk kondisi LOS dengan jarak 4 meter

Gain	4 QAM	8 QAM	16 QAM	32 QAM	64 QAM
1 = 0	0,1299917	0,149889	0,223583	0,366958	0,460669
2 = 4	0,0808708	0,120658	0,197728	0,324249	0,459419
3 = 8	0,0404	0,070658	0,157175	0,321949	0,426892
4 = 12	0,0128917	0,052325	0,124444	0,287067	0,388206
5 = 16	0,0037667	0,034694	0,106175	0,262066	0,350083
6 = 20	0,0002792	0,030111	0,087469	0,240581	0,325833
7 = 24	0,0000195	0,011244	0,052011	0,224911	0,281417
8 = 28	0,0000125	0,00928	0,03695	0,214408	0,267022
9 = 32	0,00000	0,006918	0,017325	0,200623	0,239922
10 = 36	0,00000	0,002704	0,015002	0,171478	0,215025
11 = 40	0,00000	0,000656	0,009786	0,143076	0,199106
12 = 44	0,00000	0,000378	0,006944	0,122077	0,197256
13 = 48	0,00000	7,07E-05	0,000944	0,095389	0,195236
14 = 52	0,00000	1,98E-05	0,000278	0,087994	0,192442
16 = 56	0,00000	0,00000	0,000237	0,068025	0,180733
17 = 60	0,00000	0,00000	1,88E-05	0,047433	0,177944

Tabel 4. 2 Data Hasil pengukuran *Indoor* untuk kondisi LOS dengan jarak 5 meter

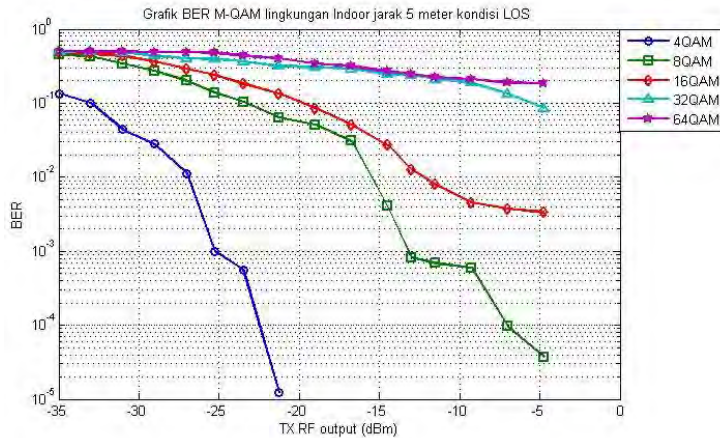
Gain	4 QAM	8 QAM	16 QAM	32 QAM	64 QAM
1 = 0	0,13400	0,45108	0,48933	0,49775	0,50002
2 = 4	0,09968	0,42804	0,46579	0,49351	0,49883
3 = 8	0,04433	0,34092	0,43713	0,48943	0,49775
4 = 12	0,02808	0,27460	0,36438	0,43327	0,49142
5 = 16	0,01126	0,20159	0,29339	0,40387	0,48943
6 = 20	0,00099	0,13944	0,23945	0,39871	0,47913
7 = 24	0,00055	0,10328	0,18265	0,36223	0,43327
8 = 28	0,00001	0,06437	0,13540	0,31487	0,40387
9 = 32	0,00000	0,05097	0,08551	0,30655	0,34159
10 = 36	0,00000	0,03094	0,05123	0,29339	0,31487
11 = 40	0,00000	0,00405	0,02721	0,24470	0,27023
12 = 44	0,00000	0,00082	0,01265	0,23945	0,24595
13 = 48	0,00000	0,00069	0,00794	0,21179	0,22127
14 = 52	0,00000	0,00060	0,00453	0,18760	0,21179
16 = 56	0,00000	0,00010	0,00376	0,13540	0,18760
17 = 60	0,00000	0,00004	0,00336	0,08551	0,18595



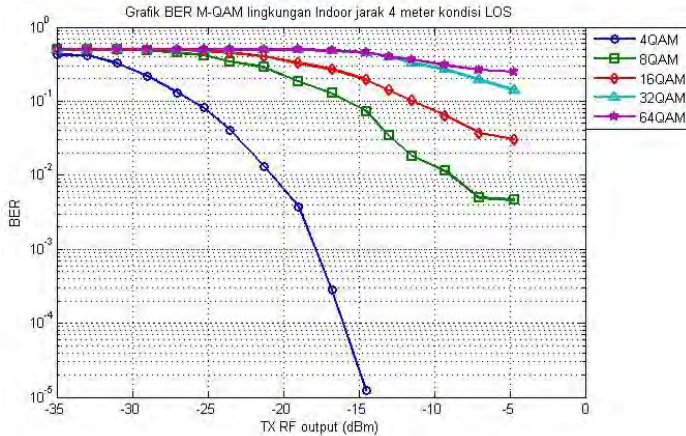
Gambar 4. 20 Grafik BER Indoor jarak 4 meter kondisi LOS

Tabel 4. 3 Data Hasil pengukuran *Indoor* untuk kondisi LOS dengan jarak 6 meter

Gain	4 QAM	8 QAM	16 QAM	32 QAM	64 QAM
1 = 0	0,42545	0,49795	0,50008	0,50138	0,50187
2 = 4	0,41761	0,49694	0,49903	0,50021	0,50138
3 = 8	0,32820	0,49578	0,49851	0,50005	0,50021
4 = 12	0,21628	0,49060	0,49426	0,50002	0,50005
5 = 16	0,12999	0,45032	0,49295	0,50008	0,50002
6 = 20	0,08087	0,41709	0,48154	0,49903	0,49931
7 = 24	0,04040	0,34435	0,44828	0,49851	0,49799
8 = 28	0,01289	0,28726	0,40143	0,49426	0,49497
9 = 32	0,00377	0,18607	0,32544	0,49295	0,49455
10 = 36	0,00028	0,12703	0,26893	0,48154	0,48140
11 = 40	0,00001	0,07281	0,19346	0,44828	0,45624
12 = 44	0,00000	0,03385	0,14018	0,40143	0,39768
13 = 48	0,00000	0,01818	0,10219	0,32544	0,36531
14 = 52	0,00000	0,01140	0,06348	0,26893	0,30523
16 = 56	0,00000	0,00492	0,03674	0,19346	0,26484
17 = 60	0,00000	0,00460	0,03040	0,14018	0,24623



Gambar 4. 21 Grafik BER Indoor jarak 5 meter kondisi LOS



Gambar 4. 22 Grafik BER Indoor jarak 6 meter kondisi LOS

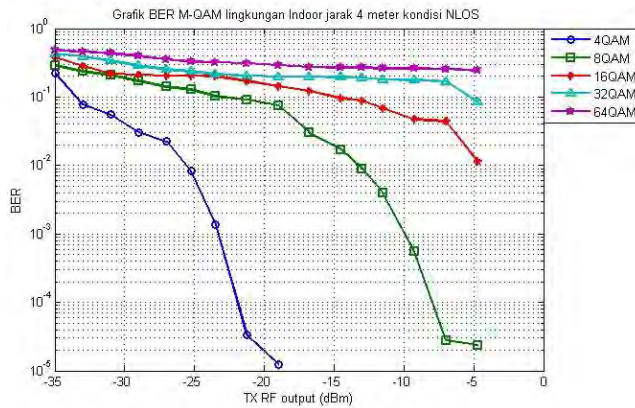
Berdasarkan Gambar 4.20, Gambar 4.21 dan Gambar 4.22 untuk teknik modulasi QAM pada jarak 4 meter kondisi LOS, nilai BER 4-QAM mencapai 0 pada saat daya yang dipancarkan sebesar -21,2 dBm, sedangkan untuk jarak 5 meter nilai BER mencapai 0 pada saat daya yang dipancarkan sebesar -21 dBm, dan untuk jarak 6 meter nilai BER mencapai 0 saat daya pancar -14,5 dBm. Hal ini menandakan bahwa jarak dan daya pancar mempengaruhi kualitas kerja sistem komunikasi ini. Dimana nilai BER semakin besar terhadap bertambahnya jarak antar *node* untuk daya pancar yang tetap tetap. Dan sebaliknya nilai BER semakin kecil terhadap bertambahnya daya yang dipancarkan untuk jarak antar *node* tetap. Ini juga berlaku untuk level modulasi (M) yang lebih tinggi seperti 8-QAM, 16-QAM, 32-QAM dan 64-QAM. Hanya saja jika level modulasi semakin tinggi maka jumlah *bit error* yang terjadi semakin banyak. Ini dapat dilihat dari Gambar 4.15, Gambar 4.16, Gambar 4.17, Gambar 4.18 dan Gambar 4.19 secara berurutan untuk perbandingan konstelasi simbol di penerima, ini menandakan bahwa level modulasi juga berpengaruh terhadap kinerja sistem.

4.2.2 Kondisi Non Line of Sight (NLOS)

Berdasarkan data hasil pengukuran pada Tabel 4.4, Tabel 4.5 dan Tabel 4.6 maka diperoleh grafik BER untuk jarak 4 meter, 5 meter dan 6 meter pada kondisi *non line of sight* (NLOS) di lingkungan *indoor* yang ditunjukkan secara berutan pada Gambar 4.23, Gambar 4.24 dan Gambar 4.25.

Tabel 4. 4 Data Hasil pengukuran *Indoor* untuk kondisi NLOS dengan jarak 4 meter

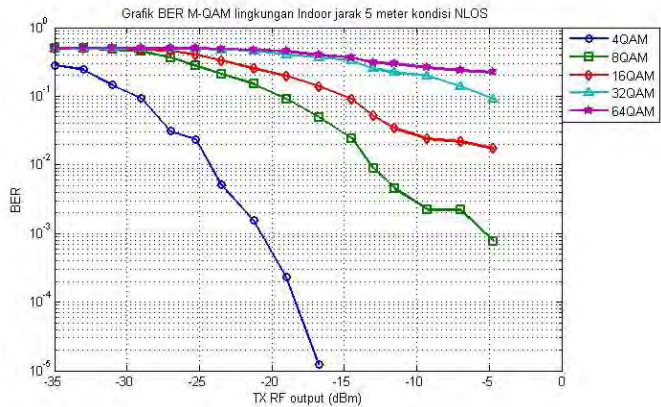
Gain	4 QAM	8 QAM	16 QAM	32 QAM	64 QAM
1 = 0	0,223583	0,288375	0,379581	0,426892	0,479018
2 = 4	0,077728	0,235548	0,282489	0,388206	0,457485
3 = 8	0,054989	0,207858	0,219494	0,337008	0,436253
4 = 12	0,030658	0,170054	0,210581	0,285258	0,398555
5 = 16	0,022325	0,140917	0,204911	0,251417	0,35382
6 = 20	0,008229	0,128775	0,204408	0,237022	0,325908
7 = 24	0,001358	0,101618	0,200623	0,216022	0,318933
8 = 28	3,33E-05	0,091244	0,171478	0,205025	0,312022
9 = 32	1,25E-05	0,074694	0,143076	0,199106	0,289948
10 = 36	0,00000	0,030111	0,122077	0,197256	0,273622
11 = 40	0,00000	0,01698	0,095389	0,195236	0,270237
12 = 44	0,00000	0,008979	0,087994	0,192442	0,267348
13 = 48	0,00000	0,003944	0,068025	0,180733	0,262142
14 = 52	0,00000	0,000556	0,047433	0,177944	0,261693
16 = 56	0,00000	2,78E-05	0,044278	0,1671	0,257125
17 = 60	0,00000	2,37E-05	0,011389	0,084444	0,243525



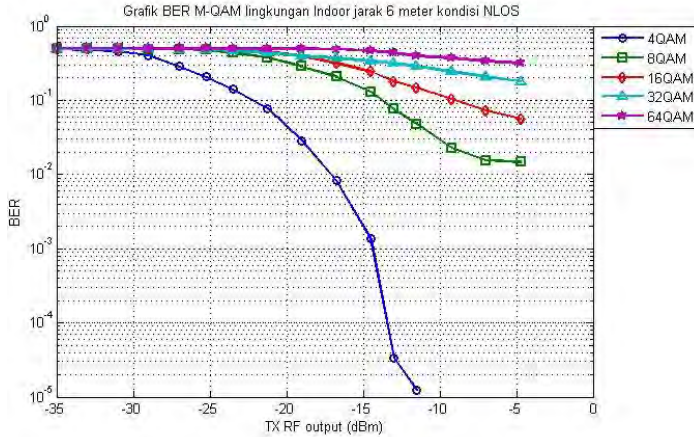
Gambar 4.23 Grafik BER Indoor jarak 4 meter kondisi NLOS

Tabel 4. 5 Data Hasil pengukuran *Indoor* untuk kondisi NLOS dengan jarak 5 meter

Gain	4 QAM	8 QAM	16 QAM	32 QAM	64 QAM
1 = 0	0,28047	0,49389	0,49678	0,50056	0,50080
2 = 4	0,24290	0,49382	0,49608	0,49939	0,50068
3 = 8	0,14566	0,47939	0,49495	0,49937	0,50056
4 = 12	0,09332	0,44768	0,47558	0,49608	0,49939
5 = 16	0,03073	0,36471	0,45394	0,49559	0,49937
6 = 20	0,02335	0,27790	0,40199	0,49495	0,49559
7 = 24	0,00515	0,21070	0,33049	0,47232	0,49001
8 = 28	0,00155	0,15075	0,25088	0,45394	0,47232
9 = 32	0,00023	0,09081	0,19623	0,40199	0,45010
10 = 36	0,00001	0,04982	0,13859	0,36471	0,39871
11 = 40	0,00000	0,02416	0,09058	0,33049	0,36223
12 = 44	0,00000	0,00892	0,05157	0,25088	0,30655
13 = 48	0,00000	0,00449	0,03398	0,22316	0,29403
14 = 52	0,00000	0,00221	0,02379	0,19623	0,26090
16 = 56	0,00000	0,00220	0,02187	0,13859	0,23678
17 = 60	0,00000	0,00077	0,01731	0,09058	0,22316



Gambar 4.24 Grafik BER Indoor jarak 5 meter kondisi NLOS



Gambar 4.25 Grafik BER Indoor jarak 6 meter kondisi NLOS

4.3 Analisa Hasil Pengukuran dengan Teknik Modulasi M-QAM (*Outdoor*)

Pengukuran *outdoor* dengan teknik modulasi M-QAM dilakukan dengan mengubah jarak antar *node* pengirim dan penerima dengan jarak 5 meter dan 6 meter. Jumlah bit yang dikirim adalah 120000 bit. Nilai $Tx_BB = 1$, $Tx_Rf = 60$ dengan step 3, $Rx_BB = 1$, dan $Rx_Rf = 1$.

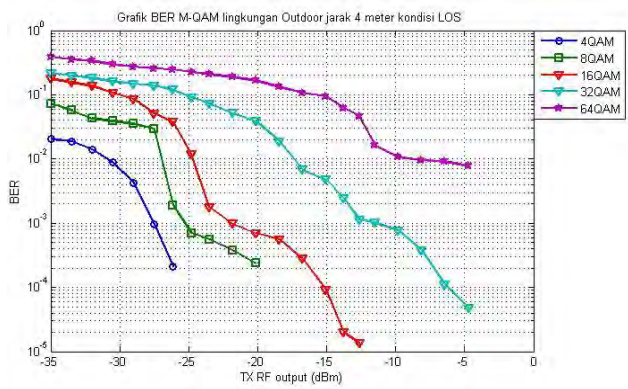
4.3.1 Kondisi *Line of Sight* (LOS)

Berdasarkan data hasil pengukuran pada Tabel 4.7, Tabel 4.8 dan Tabel 4.9 maka diperoleh grafik BER untuk jarak 4 meter, 5 meter dan 6 meter pada kondisi *line of sight* (LOS) di lingkungan *outdoor* yang ditunjukkan secara berutan pada Gambar 4.26, Gambar 4.27 dan Gambar 4.28.

Berdasarkan Gambar 4.26, Gambar 4.27 dan Gambar 4.28 untuk teknik modulasi QAM pada jarak 4 meter kondisi LOS, nilai BER 4-QAM mencapai 0 pada saat daya yang dipancarkan sebesar -26 dBm, sedangkan untuk jarak 5 meter nilai BER mencapai 0 pada saat daya yang dipancarkan sebesar -23,5 dBm, dan untuk jarak 6 meter nilai BER mencapai 0 saat daya pancar -20 dBm. Sama pada saat pengukuran di lingkungan *indoor* kondisi LOS, hal ini menandakan bahwa jarak dan daya pancar mempengaruhi kualitas kerja sistem komunikasi ini.

Tabel 4. 6 Data Hasil pengukuran *Indoor* untuk kondisi NLOS dengan jarak 6 meter

Gain	4 QAM	8 QAM	16 QAM	32 QAM	64 QAM
1 = 0	0,4899	0,5004	0,4996	0,4989	0,5005
2 = 4	0,4838	0,4996	0,4989	0,4987	0,5004
3 = 8	0,4564	0,4988	0,4987	0,4987	0,5001
4 = 12	0,4018	0,4917	0,4987	0,4957	0,4993
5 = 16	0,2884	0,4896	0,4957	0,4917	0,4989
6 = 20	0,2079	0,4764	0,4949	0,4892	0,4985
7 = 24	0,1401	0,4383	0,4833	0,4631	0,4978
8 = 28	0,0781	0,3757	0,4575	0,4325	0,4977
9 = 32	0,0288	0,2846	0,3987	0,3952	0,4969
10 = 36	0,0082	0,2062	0,3176	0,3719	0,4892
11 = 40	0,0014	0,1307	0,2457	0,3350	0,4631
12 = 44	0,0000	0,0762	0,1783	0,3176	0,4325
13 = 48	0,0000	0,0481	0,1487	0,2846	0,3952
14 = 52	0,0000	0,0228	0,1041	0,2457	0,3719
16 = 56	0,0000	0,0155	0,0723	0,2062	0,3350
17 = 60	0,0000	0,0146	0,0566	0,1783	0,3176



Gambar 4.26 Grafik BER Outdoor jarak 4 meter kondisi LOS

Tabel 4. 7 Data Hasil pengukuran *Outdoor* untuk kondisi LOS dengan jarak 4 meter

Gain	4 QAM	8 QAM	16 QAM	32 QAM	64 QAM
1 = 0	0,02045	0,07325	0,177728	0,21949405	0,388206
2 = 3	0,01886	0,057175	0,154989	0,19706659	0,352457
3 = 6	0,01395	0,042444	0,136583	0,1812066	0,337008
4 = 9	0,00883	0,038694	0,107233	0,16098098	0,295258
5 = 12	0,00421	0,035111	0,085618	0,14911111	0,271417
6 = 15	0,00097	0,02928	0,051244	0,13840833	0,257022
7 = 18	0,00021	0,001918	0,037469	0,12006231	0,246022
8 = 21	0,00000	0,000704	0,012011	0,09147778	0,225025
9 = 24	0,00000	0,000556	0,001798	0,07307605	0,209106
10 = 27	0,00000	0,000378	0,000979	0,05207719	0,187256
11 = 30	0,00000	0,000237	0,000694	0,03888889	0,165236
12 = 33	0,00000	0,00000	0,000556	0,01879944	0,132442
13 = 36	0,00000	0,00000	0,000278	0,0068025	0,107333
14 = 39	0,00000	0,00000	9,19E-05	0,00474333	0,094444
15 = 42	0,00000	0,00000	1,99E-05	0,00242778	0,061671
16 = 45	0,00000	0,00000	1,35E-05	0,00113889	0,046584
17 = 48	0,00000	0,00000	0,00000	0,00101611	0,016245
18 = 51	0,00000	0,00000	0,00000	0,0007725	0,010737
19 = 54	0,00000	0,00000	0,00000	0,0003775	0,009539
20 = 57	0,00000	0,00000	0,00000	0,0001111	0,009133
21 = 60	0,00000	0,00000	0,00000	0,00004754	0,007719

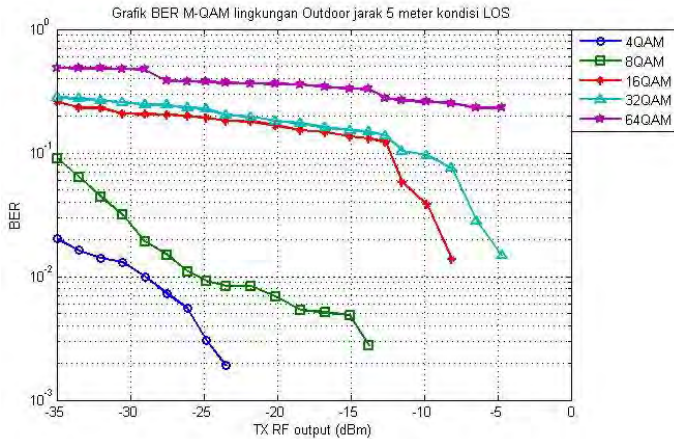
Dimana nilai BER semakin besar terhadap bertambahnya jarak antar *node* untuk daya pancar yang tetap tetap. Dan sebaliknya nilai BER semakin kecil terhadap bertambahnya daya yang dipancarkan untuk jarak antar *node* tetap. Ini juga berlaku untuk level modulasi (M) yang lebih tinggi seperti 8-QAM, 16-QAM, 32-QAM dan 64-QAM. Hanya saja jika level modulasi semakin tinggi maka jumlah *bit error* yang terjadi semakin banyak, ini menandakan bahwa level modulasi juga berpengaruh terhadap kinerja sistem.

Tabel 4. 8 Data Hasil pengukuran *Outdoor* untuk kondisi LOS dengan jarak 5 meter

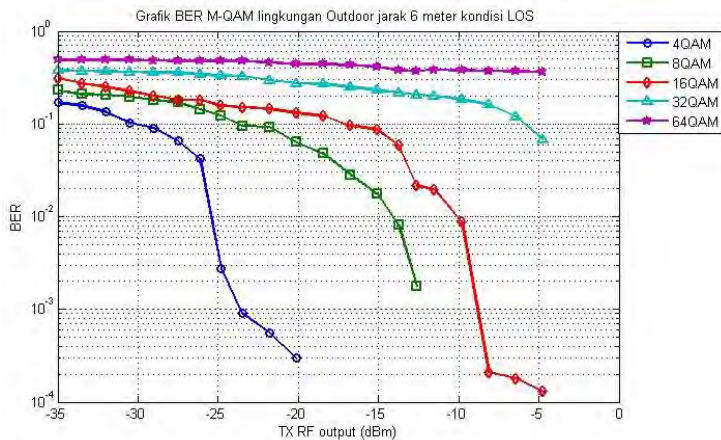
Gain	4 QAM	8 QAM	16 QAM	32 QAM	64 QAM
1 = 0	0,02028	0,09048	0,25853	0,28068	0,48741
2 = 3	0,01632	0,06338	0,23199	0,27481	0,48255
3 = 6	0,01409	0,04428	0,22995	0,26389	0,48115
4 = 9	0,01300	0,03139	0,20748	0,25674	0,47810
5 = 12	0,00993	0,01916	0,20491	0,24458	0,47191
6 = 15	0,00724	0,01493	0,20441	0,24357	0,38214
7 = 18	0,00551	0,01098	0,19847	0,23006	0,37668
8 = 21	0,00304	0,00921	0,19148	0,22670	0,37385
9 = 24	0,00191	0,00835	0,18160	0,20249	0,36763
10 = 27	0,00000	0,00834	0,17997	0,19494	0,36261
11 = 30	0,00000	0,00688	0,16572	0,18067	0,36036
12 = 33	0,00000	0,00537	0,15191	0,17207	0,35832
13 = 36	0,00000	0,00508	0,14601	0,16058	0,33884
14 = 39	0,00000	0,00488	0,13540	0,15201	0,33169
15 = 42	0,00000	0,00274	0,13093	0,14814	0,32734
16 = 45	0,00000	0,00000	0,12208	0,13776	0,27684
17 = 48	0,00000	0,00000	0,05799	0,10377	0,26416
18 = 51	0,00000	0,00000	0,03803	0,09539	0,25897
19 = 54	0,00000	0,00000	0,01389	0,07539	0,25097
20 = 57	0,00000	0,00000	0,00000	0,02799	0,23199
21 = 60	0,00000	0,00000	0,00000	0,01476	0,22995

Tabel 4. 9 Data Hasil pengukuran *Outdoor* untuk kondisi LOS dengan jarak 6 meter

Gain	4 QAM	8 QAM	16 QAM	32 QAM	64 QAM
1 = 0	0,17061	0,22995	0,30995	0,37668	0,49156
2 = 3	0,15769	0,20748	0,27483	0,37385	0,48966
3 = 6	0,13464	0,20491	0,24911	0,36763	0,48824
4 = 9	0,10291	0,19441	0,22441	0,36261	0,48568
5 = 12	0,09013	0,18148	0,20148	0,36036	0,48456
6 = 15	0,06510	0,17061	0,18160	0,35832	0,47735
7 = 18	0,04205	0,14308	0,17997	0,33884	0,47716
8 = 21	0,00275	0,12208	0,15719	0,33169	0,47678
9 = 24	0,00090	0,09539	0,15191	0,32734	0,47432
10 = 27	0,00056	0,09277	0,14601	0,29684	0,46096
11 = 30	0,00030	0,06375	0,13093	0,27416	0,44098
12 = 33	0,00000	0,04799	0,12208	0,26897	0,43844
13 = 36	0,00000	0,02803	0,09603	0,25097	0,43011
14 = 39	0,00000	0,01743	0,08630	0,23199	0,41336
15 = 42	0,00000	0,00811	0,05864	0,21748	0,37668
16 = 45	0,00000	0,00180	0,02148	0,20491	0,37385
17 = 48	0,00000	0,00000	0,01972	0,19953	0,38214
18 = 51	0,00000	0,00000	0,00878	0,18308	0,37668
19=54	0,00000	0,00000	0,00021	0,16208	0,37385
20 = 57	0,00000	0,00000	0,00018	0,12039	0,36763
21 = 60	0,00000	0,00000	0,00013	0,06799	0,36261



Gambar 4.27 Grafik BER Outdoor jarak 5 meter kondisi LOS



Gambar 4.28 Grafik BER Outdoor jarak 6 meter kondisi LOS

4.3.2 Kondisi *Non Line of Sight* (NLOS)

Berdasarkan data hasil pengukuran pada Tabel 4.10, Tabel 4.11 dan Tabel 4.12 maka diperoleh grafik BER untuk jarak 4 meter, 5 meter dan 6 meter pada kondisi *non line of sight* (NLOS) di lingkungan

outdoor yang ditunjukkan secara berutan pada Gambar 4.29, Gambar 4.30 dan Gambar 4.31.

Tabel 4. 10 Data Hasil pengukuran *Outdoor* untuk kondisi NLOS dengan jarak 6 meter

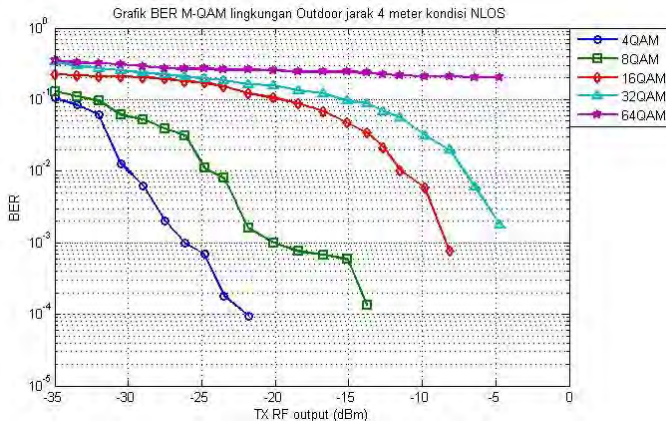
Gain	QAM	8-QAM	16-QAM	32-QAM	64-QAM
1 = 0	0,02045	0,07325	0,17773	0,21949	0,38821
2 = 3	0,01886	0,05718	0,15499	0,19707	0,35246
3 = 6	0,01395	0,04244	0,13658	0,18121	0,33701
4 = 9	0,00883	0,03869	0,10723	0,16098	0,29526
5 = 12	0,00421	0,03511	0,08562	0,14911	0,27142
6 = 15	0,00097	0,02928	0,05124	0,13841	0,25702
7 = 18	0,00021	0,00192	0,03747	0,12006	0,24602
8 = 21	0,00000	0,00070	0,01201	0,09148	0,22503
9 = 24	0,00000	0,00056	0,00180	0,07308	0,20911
10 = 27	0,00000	0,00038	0,00098	0,05208	0,18726
11 = 30	0,00000	0,00024	0,00069	0,03889	0,16524
12 = 33	0,00000	0,00000	0,00056	0,01880	0,13244
13 = 36	0,00000	0,00000	0,00028	0,00680	0,10733
14 = 39	0,00000	0,00000	0,00009	0,00474	0,09444
15 = 42	0,00000	0,00000	0,00002	0,00243	0,06167
16 = 45	0,00000	0,00000	0,00001	0,00114	0,04658
17 = 48	0,00000	0,00000	0,00000	0,00102	0,01625
18 = 51	0,00000	0,00000	0,00000	0,00077	0,01074
19 = 54	0,00000	0,00000	0,00000	0,00038	0,00954
20 = 57	0,00000	0,00000	0,00000	0,00011	0,00913
21 = 60	0,00000	0,00000	0,00000	0,00005	0,00772

Berdasarkan Gambar 4.29, Gambar 4.30 dan Gambar 4.31 untuk teknik modulasi QAM pada jarak 4 meter kondisi NLOS, nilai BER 4-QAM mencapai 0 pada saat daya yang dipancarkan sebesar -21,5 dBm, sedangkan untuk jarak 5 meter nilai BER mencapai 0 pada saat daya yang dipancarkan sebesar -16,5 dBm, dan untuk jarak 6 meter nilai BER

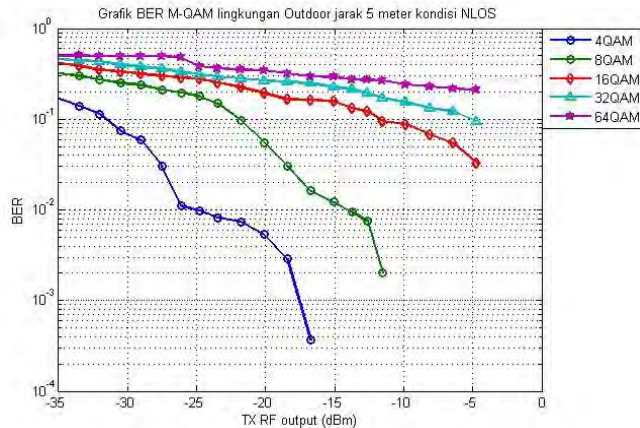
mencapai 0 saat daya pancar -15 dBm. Sama seperti pada pengukuran lingkungan *indoor* kondisi NLOS bahwa jarak dan daya pancar mempengaruhi kualitas kerja sistem komunikasi ini. Dimana nilai BER semakin besar terhadap bertambahnya jarak antar *node* untuk daya pancar yang tetap tetap. Dan sebaliknya nilai BER semakin kecil terhadap bertambahnya daya yang dipancarkan untuk jarak antar *node* tetap. Ini juga berlaku untuk level modulasi (M) yang lebih tinggi seperti 8-QAM, 16-QAM, 32-QAM dan 64-QAM.

Tabel 4. 11 Data Hasil pengukuran *Outdoor* untuk kondisi NLOS dengan jarak 5 meter

Gain	4 QAM	8 QAM	16 QAM	32 QAM	64 QAM
1 = 0	0,16824	0,32056	0,41399	0,45749	0,49892
2 = 3	0,14048	0,30083	0,38538	0,44012	0,49832
3 = 6	0,11378	0,27526	0,35156	0,43486	0,49798
4 = 9	0,07428	0,25142	0,33602	0,39983	0,49793
5 = 12	0,05889	0,23702	0,31556	0,37591	0,49580
6 = 15	0,03016	0,21020	0,30106	0,35893	0,49475
7 = 18	0,01099	0,19524	0,28733	0,33202	0,47497
8 = 21	0,00978	0,17924	0,27794	0,30948	0,38230
9 = 24	0,00821	0,14936	0,25167	0,29362	0,36140
10 = 27	0,00735	0,09673	0,22458	0,28024	0,35001
11 = 30	0,00534	0,05499	0,19390	0,26735	0,34407
12 = 33	0,00288	0,03066	0,16584	0,25642	0,32104
13 = 36	0,00037	0,01618	0,16245	0,24933	0,29720
14 = 39	0,00000	0,01223	0,15737	0,22466	0,28995
15 = 42	0,00000	0,00944	0,13343	0,21435	0,27362
16 = 45	0,00000	0,00747	0,12208	0,19324	0,27024
17 = 48	0,00000	0,00201	0,09539	0,17242	0,26735
18 = 51	0,00000	0,00000	0,08799	0,15237	0,24142
19 = 54	0,00000	0,00000	0,06803	0,13343	0,22702
20 = 57	0,00000	0,00000	0,05468	0,12208	0,21602
21 = 60	0,00000	0,00000	0,03267	0,09539	0,20903



Gambar 4.29 Grafik BER Outdoor jarak 4 meter kondisi NLOS



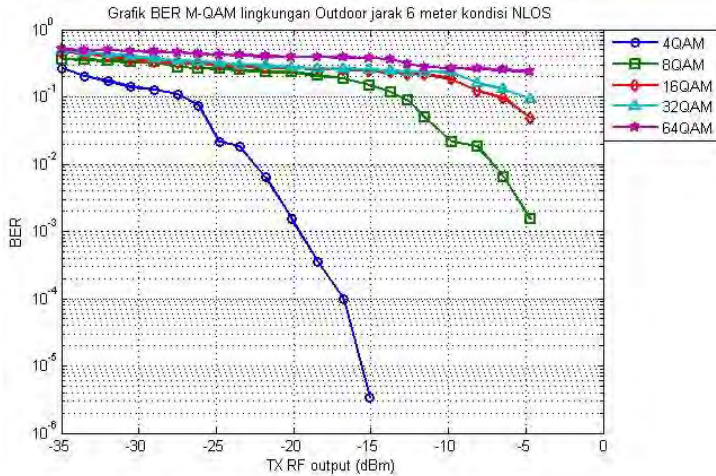
Gambar 4.30 Grafik BER Outdoor jarak 5 meter kondisi NLOS

Jika dibandingkan hasil pengukuran di lingkungan *indoor* dengan di lingkungan *outdoor*, hasil pengukuran di lingkungan *outdoor* jauh lebih baik jika dibandingkan dengan hasil pengukuran di lingkungan *outdoor*. Ini berlaku untuk pengukuran pada kondisi *line of sight* (LOS) dan *non line of sight* (NLOS). *Sample* perbandingan untuk hasil pengukuran di lingkungan *indoor* dan di lingkungan *outdoor* dapat dilihat pada Gambar 4.32, dimana nilai BER untuk 4-QAM kondisi

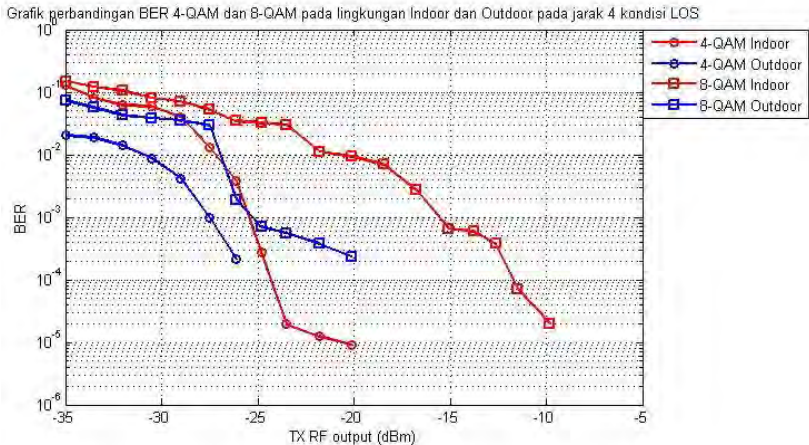
outdoor mencapai nilai nol saat daya yang dipancarkan sebesar -26 dBm sedangkan untuk kondisi *indoor* pada jarak dan level modulasi yang sama, daya pancar yang dibutuhkan untuk mencapai BER sama dengan nol adalah -21,2 dBm. Sedangkan *sample* untuk perbandingan kondisi LOS dan NLOS dapat dilihat pada Gambar 4.33 dan gambar hasil pengukuran kinerja 4-QAM untuk jarak 4 meter, 5 meter dan 6 meter pada lingkungan *outdoor* dapat dilihat pada Gambar 4.34.

Tabel 4. 12 Data Hasil pengukuran *Outdoor* untuk kondisi NLOS dengan jarak 6 meter

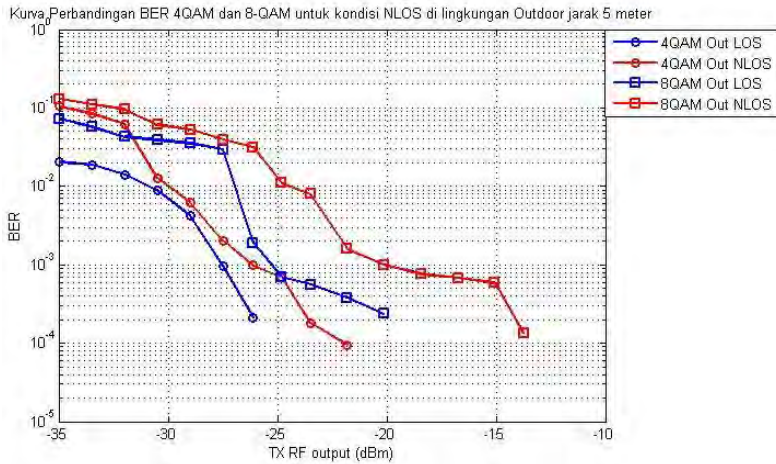
Gain	4 QAM	8 QAM	16 QAM	32 QAM	64 QAM
1 = 0	0,2682	0,3649	0,4575	0,4883	0,4991
2 = 3	0,2022	0,3583	0,4363	0,4538	0,4968
3 = 6	0,1706	0,3388	0,3986	0,4288	0,4935
4 = 9	0,1405	0,3317	0,3538	0,3963	0,4778
5 = 12	0,1276	0,3273	0,3259	0,3661	0,4651
6 = 15	0,1088	0,2768	0,3189	0,3410	0,4577
7 = 18	0,0738	0,2642	0,3120	0,3322	0,4302
8 = 21	0,0216	0,2590	0,2899	0,3189	0,4255
9 = 24	0,0184	0,2510	0,2736	0,2956	0,4171
10 = 27	0,0064	0,2320	0,2702	0,2908	0,4008
11 = 30	0,0015	0,2300	0,2673	0,2695	0,3910
12 = 33	0,0003	0,2075	0,2621	0,2677	0,3894
13 = 36	0,0001	0,1857	0,2571	0,2617	0,3825
14 = 39	0,0000	0,1490	0,2432	0,2541	0,3791
16 = 45	0,0000	0,1169	0,2335	0,2424	0,3610
15 = 42	0,0000	0,0888	0,2175	0,2372	0,3110
17 = 48	0,0000	0,0491	0,2149	0,2346	0,2768
18 = 51	0,0000	0,0216	0,1831	0,2300	0,2642
19 = 54	0,0000	0,0184	0,1221	0,1621	0,2590
20 = 57	0,0000	0,0064	0,0954	0,1304	0,2510
21 = 60	0,0000	0,0015	0,0480	0,0938	0,2320



Gambar 4.31 Grafik BER Outdoor jarak 6 meter kondisi NLOS



Gambar 4.32 Grafik perbandingan BER 4-QAM dan 8-QAM pada lingkungan *indoor* dan *outdoor* pada jarak 4 meter kondisi LOS



Gambar 4.33 Grafik perbandingan BER 4-QAM dan 8-QAM pada lingkungan *outdoor* pada jarak 5 meter kondisi LOS



Gambar 4.34 Grafik perbandingan BER 4-QAM untuk jarak 4, 5, dan 6 meter pada lingkungan *outdoor*

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan pembahasan yang telah dilakukan pada Bab IV, maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Perbandingan kinerja sistem komunikasi SISO dengan teknik modulasi M-QAM ditunjukkan pada nilai BER yang diperoleh dengan mengubah jarak antar *node* pengirim dan penerima.
2. Untuk pengukuran di lingkungan *indoor* pada kondisi LOS, hasil pengukuran dengan nilai BER terkecil diperoleh pada saat pengukuran dengan jarak 4 meter. Dimana dibutuhkan daya pancar yang lebih kecil untuk mencapai nilai nol jika dibandingkan dengan jarak 5 meter dan 6 meter untuk level modulasi yang sama. Untuk 4-QAM membutuhkan daya pancar sebesar -21,2 dBm dan untuk jarak 5 meter dan 6 meter adalah -21 dBm dan -14,5 dBm.
3. Untuk pengukuran di lingkungan *indoor* pada kondisi NLOS, hasil pengukuran dengan nilai BER terkecil diperoleh pada saat pengukuran dengan jarak 4 meter. Dimana dibutuhkan daya pancar yang lebih kecil untuk mencapai nilai nol jika dibandingkan dengan jarak 5 meter dan 6 meter untuk level modulasi yang sama. Untuk 4-QAM membutuhkan daya pancar sebesar -19 dBm dan untuk jarak 5 meter dan 6 meter adalah -17 dBm dan -12 dBm.
4. Nilai BER semakin besar terhadap bertambahnya jarak antar *node* untuk daya pancar tetap, ini menandakan jarak sangat mempengaruhi kualitas kinerja teknik modulasi M-QAM pada WARP. Ini dapat dilihat pada BAB IV pada Gambar 4.34, dimana nilai BER untuk 4-QAM mencapai nilai 0 untuk jarak 4 meter hanya membutuhkan daya pancar -26 dBm, nilai ini lebih kecil jika dibandingkan dengan daya pancar yang dibutuhkan pada saat jarak 5 meter dan 6 meter yaitu -23,5 dan -20. Hal ini menandakan daya pancar mempengaruhi kinerja sistem modulasi M-QAM pada WARP.
5. Hasil pengukuran di lingkungan *outdoor* memiliki nilai BER yang lebih kecil dibandingkan saat pengukuran di lingkungan *indoor*. Ini dapat dilihat pada Gambar 4.32, dimana nilai BER untuk 4-QAM dan 8-QAM pada lingkungan *outdoor* lebih kecil dibandingkan untuk 4-QAM dan 8-QAM pada

lingkungan *indoor*. Ini disebabkan karena kondisi lingkungan indoor memiliki pantulan yang besar dibandingkan kondisi outdoor

6. Hasil pengukuran tidak tetap karena kondisi kanal yang real yang tidak tetap performanya. Oleh karena itu terdapat beberapa hasil pengukuran tidak sesuai dengan apa yang diharapkan.
7. Level modulasi berbanding lurus dengan nilai BER yang dihasilkan, semakin tinggi level modulasi yang digunakan, maka semakin tinggi pula nilai BER yang dihasilkan yang menyebabkan kinerja sistem menjadi tidak maksimal.
8. Nilai BER semakin kecil terhadap bertambahnya daya yang dipancarkan untuk jarak antar *node* tetap.

5.2 Saran

Mencoba mengirimkan Informasi berupa suara, *image*, atau video.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Madhow, Upamanyu. *Fundamentals of Digital Communications*: New York : Cambridge University Press, 2008.
- [2]. Proakis, John G. "*Digital Communications 4th edition*".s.1: McGraw-Hill Science. 2000
- [3]. Amiri, K., Sun, Y., Murphy, P., Hunter, C., Cavallaro, J. R., & Sabharwal, A. "WARP, a Unified Wireless Network Testbed for Education and Research". IEEE International Conference on Microelectronic Systems Education. 2007
- [4]. Rappaport, Theodore S. "*Wireless Communication Principles and Practice*". V-soft.net. 1996
- [5]. Wilson, Stephen G. "*Digital Modulation and Coding*". Prentice-hall International. 1996
- [6]. K, Kisiel. D, Sahota. G, Swaminathan. "*Quadrature Amplitude Modulation : A simulation study*". Simon Frasier University. Canada. 2005
- [7]. WARPLab 6 Framework overview. *WARP Project – Wireless Open Access Research Platform*. [Online] September 2014. [Disunting: September 12, 2014.] <http://warpproject.org/trac/wiki/WARPLab6>.
- [8]. Murphy, P., Subharwal, A., Aazhang, B., Design Of WARP, *A Wireless Open-Access Research Platform*. 5, 1-5
- [9]. WARP radio board overview - Wireless Open Access Research Platform. [Online] September 2014. [Disunting: September 12, 2014.]
- [10]. http://warpproject.org/trac/wiki/HardwareUsersGuides/RadioBoard_v1.4.
- [11]. Sklar, Bernard. "*Digital Communications Fundamentals and Applications 2^{end} edition*".California: Prentice Hall.1987
- [12]. Sri Hartanto, 2010. Pengurangan Bit Error Pada Modulasi M-QAM Dalam Kanal Rayleigh Fading Dengan Teknik Spatial Multiplexing Dan Metode ZF-SIC, MMSE-SIC, Maximum Likelihood. Tesis. Universitas Indonesia
- [13]. Daniel Aspel, 2004. Adaptive Multilevel Quadrature Amplitude Radio Implementation in Programmable Logic. Thesis. University of Saskatchewan

Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN A

Jurusan Teknik Elektro – FTI
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

TE 141599 TUGAS AKHIR – 4 SKS

Nama Mahasiswa : Fanny Ananta Marpalinda
Nomer Pokok : 2212106027
Bidang Studi : Teknik Telekomunikasi dan Multimedia
Tugas Diberikan : Semester Gasal 2014/2015
Dosen Pembimbing : 1. Dr. Ir. Suwadi, MT
2. Dr. Ir. Titiek Suryani, MT
Judul Tugas Akhir : **Implementasi dan Evaluasi Kinerja Sistem Komunikasi M-ary Quadrature Amplitude Modulation (M-QAM) Menggunakan *Wireless Open-Access Research Platform* (WARP)**
(Implementation and Performance Evaluation of M-ary Quadrature Amplitude Modulation (M-QAM) Communications Systems Using Wireless Open-Access Research Platform (WARP))

23 SEP 2014

Uraian Tugas Akhir :

Teknik modulasi digital dalam dunia telekomunikasi telah berkembang dengan cepat, namun bukan berarti teknik modulasi yang mendasari perkembangan teknik modulasi yang baru tidak digunakan lagi. Salah satunya adalah teknik modulasi M-ary Quadrature Amplitude Modulation (QAM). Teknik modulasi M-QAM digunakan dalam penransmisi pada laju bit-bit yang lebih tinggi pada saluran/kanal dengan lebar pita yang terbatas. Implementasi M-QAM pada *Wireless Open-Access Research Platform* (WARP) yang merupakan salah satu jenis SDR (*Software Defined Radio*). Modul WARP tersebut akan digunakan sebagai model pemancar dan penerima pada pengukuran kualitas unjuk kinerja sistem M-QAM. Sehingga akan diketahui sampai level berapa M-QAM dapat diimplementasikan pada WARP dengan menggunakan *software* MATLAB. Pengukuran kualitas kinerja teknik modulasi M-QAM akan dilakukan pada lingkungan *indoor* dan *outdoor*. Hasil yang diharapkan yaitu mengetahui hingga M (tingkat modulasi) berapa teknik modulasi M-QAM dapat diterapkan pada WARP dengan meninjau *Bit Error Rate* (BER) pada lingkungan *indoor* dan *outdoor*.

Kata Kunci : M-QAM, WARP, *Bit Error Rate*

Dosen Pembimbing I


Dr. Ir. Suwadi, MT
NIP. 19680818 1993031 002
Mengetahui,
Jurusan Teknik Elektro FTI-ITS
Ketua,

Dr. Tri Arief Sardiono, ST, MT
NIP. 19700212 1995121 001

Dosen Pembimbing II



Dr. Ir. Titiek Suryani, MT
NIP. 19641130 1989032 001
Menyetujui,
Bidang Studi Telekomunikasi Multimedia
Koordinator,

Dr. Ir. Endroyono, D.E.A
NIP. 19650404 1991021 001

Gambar A.1 Lembar Pengesahan Proposal Tugas Akhir

Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN B



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

Kampus ITS Gedung B & C Sukolilo Surabaya - 60111
Telp. (031) 594 7302, 5994251 s/d 54 Pes. 1206
Fax. (031) 5931237
e-mail : elits@ee.its.ac.id
Website: <http://www.ee.its.ac.id>

MONITORING KEGIATAN TUGAS AKHIR

Nama Mahasiswa : Fanny Ananta M

Judul Tugas Akhir : Implementasi dan Evaluasi Kinerja Sistem komunikasi M-ary Quadrature Amplitude Modulation (M-QAM) menggunakan WARP

Bulan Proposal Disahkan : September 2014

































Dosen Pembimbing 1 : Dr. Ir. Suwadi, MT

Dosen Pembimbing 2 : Dr. Ir. Titrek Suryana, MT

Nrp 2212106027

NIP 19680818 1993031 002

NIP 19641130 1989032 001

No	Tanggal	Uraian Kegiatan	Tanda Tangan		Mahasiswa	Keterangan
			Pembimbing (1)	Pembimbing (2)		
1	23 Sept 2014	Mempelajari program Tx				
2	30 Sept 2014	Mempelajari Teori M-QAM				
3	10 Okt 2014	Menunjukkan Program Simulasi antenna Tx dan Rx				
4	17 Okt 2014	Menunjukkan hasil Simulasi SSQ QAM				
5	24 Okt 2014	Revisi program hasil Simulasi				
6	31 Okt 2014	Menunjukkan Program hasil revisi				
7	4 Nov 2014	Konsultasi tentang Program fix				
8	11 Nov 2014	Konsultasi tentang hasil Pengukuran Indoor				
9	18 Nov 2014	Konsultasi hasil pengukuran Indoor MLO				
10	25 Nov 2014	Konsultasi hasil pengukuran outdoor LOS				
11	2 Des 2014	Konsultasi hasil pengukuran outdoor MLO				
12	9 Des 2014	Konsultasi analisa hasil pengukuran LOS dan MLO				
13	16 Des 2014	Konsultasi analisa hasil pengukuran outdoor dan Indoor				
14	19 Des 2014	Menyerahkan laporan TA Bab I - Bab III				
15	24 Des 2014	Menyerahkan laporan lengkap				
16	29 Des 2014	Menyerahkan laporan revisi Bab I - Bab V				

Gambar B.1 Lembar Monitoring Tugas Akhir

Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN C

Program 1

```
% Inialisasi.m
% Proses inialisasi sistem. dimana Hal yang
% dilakukan adalah sebagai berikut:
%   - Definisi vektor waktu
%   - Definisi Frekuensi sampling sistem
%   - Definisi sistem modulasi

%Frek. sampling dan waktu sampling
Fs = 40e6;
Ts = 1/Fs;

%Vektor waktu
L = 2^14;
t = (0:L-1)/Fs;

%Sistem modulasi yang digunakan
M = 4;
k = log2(M);
if M > 2
    ph_off = 0;
    h_bb_mod =
modem.qammod('M',M,'PhaseOffset',ph_off);
    h_bb_demod =
modem.qamdemod('M',M,'PhaseOffset',ph_off);
else
    h_bb_mod = modem.qammod('M',M);
    h_bb_demod = modem.qamdemod('M',M);
end
```

Program 2

```
% Proses pembentukan frame untuk proses
% transmisi data. Pada tiap-tiap
% langkah akan dijabarkan proses pembentukan
% frame.

%Data bit
```

```

% definisi data biner yang ditransmisikan. Data
bisa berbentuk apapun,
% misalnya, biner acak/ data dari
suara/gambar/video

%Random binary
n_bits = 120000
n_bin = randi([0 1],n_bits,1);
n_syms = n_bits/k;
n_sym = reshape(n_bin,n_syms,k);
n_dat = bi2de(n_sym,'left-msb');

%Menghitung total data payload yang dibutuhkan,
setelah dikurangi preamble,
%txDelay dan CSI bits
%Menentukan symbol rate, mencari nilai upsample
rate untuk SRRC Filter. Satuan
%symbol rate adalah symbol/s
Rsym = 4e6;
nsamp = floor(Fs/Rsym);

%Nilai nsamp harus integer, setelah pembulatan
kebawah, hitung rate simbol
%sebenarnya.
Rsym = Fs/nsamp;

%Pembentukan Preamble
% Preamble bertujuan untuk penentuan titik
sampling pertama pada penerima.
%pream = [-1;-1;-1;1;-1;0;0;0;0;0;0;0;0];
pream = [0;0;0;0;-1+1i;1-1i;-1+1i;-1+1i;-1+1i;1-
1i;-1+1i;0;0;0;0;0;0;0;0];
pream_len = length(pream);

%Correlation Matrix
% Pembentukan matriks korelasi preamble
corr_win = 300; %at least corr_win >=
pream_up = upsample(pream,nsamp);
ref_vect = zeros(corr_win,1);
ref_vect(1:length(pream_up)) = pream_up;

```

```

ref_matx =
toeplitz(ref_vect,circshift(ref_vect(corr_win:-
1:1),1));

%Definisi Transmission delay
% Panjang frame L akan dikurangi sejumlah delay
untuk menangani
% transmission delay. Jika semua frame terisi
informasi, ketika terjadi
% delay pada proses transmisi, maka akan ada
data yang tidak tertangkap
% pada penerima. Sehingga diperlukan delay
transmisi. Satuan : sampel
txDelay = 400;

%Phase ambiguity detector/ Channel State
Information sequence
% Bertujuan untuk menangani ambiguitas
fasa/perputaran pada konstellasi.
% Agar sistem SIMO bisa berfungsi dengan baik,
data yang diterima harus
% terletak pada kuadran yang sesuai. Gunakan CSI
dengan nilai 1
CSI_syms = 150; %Jumlah simbol untuk CSI
CSI_dat = ones(CSI_syms,1);

%Desain Square Root Raised Cosine
%Parameter desain menggunakan nsamp sebagai
upsample rate, N_SRRRC sebagai
%orde filter dan roll-off factor R_SRRRC
shape = 'Square Root Raised Cosine';
N_Ord = 6; %Genap
R_SRRRC = 0.9; %[0-1]
SRRRC_spec =
fdesign.pulseshaping(nsamp,shape,'Nsym,Beta',N_O
rd,R_SRRRC);
h_SRRRC = design(SRRRC_spec);
flt_delay = h_SRRRC.order/2; %or nsamp*N_Ord
norm_factor = max(h_SRRRC.numerator);
h_SRRRC.numerator = h_SRRRC.numerator/norm_factor;
%Normalisasi filter

```

```

%Jumlah simbol maksimum yang bisa dimuat dalam
satu transmission frame,
%data_sym mencakup CSI dan data yang
ditransmisikan
data_sym = floor((L-(pream_len*nsamp)-txDelay-
flt_delay)/nsamp);

%Baseband Modulation
% Mulai proses modulasi baseband (BB). Kecuali
preamble dan CSI, semua
% symbol frame akan mengalami modulasi baseband.
n_sym_dat = modulate(h_bb_mod,n_dat);

%Bit stuffing and frame construction
% Bit stuffing adalah memasukan symbol 1 (CSI)
secara periodik dalam 1
% frame transmisi. Fungsi bit stuffing ini
adalah sebagai metode untuk
% melakukan interpolasi dan estimasi kanal pada
penerima. Dalam satu frame
% transmisi akan memiliki total simbol <=
data_sym tergantung dari jumlah
% symbol CSI yang digunakan.
% Representasi grafis bit stuffing:
% |-----data_sym-----
-----|
% CSI - <sub-frames> -- CSI - <sub-frames> --
... - <sub-frames> -- CSI

%Tentukan jumlah simbol data diantara simbol CSI
sym_size = floor(data_sym/(CSI_syms-1))-1;
%Tentukan total sub-frame data
sub_frame = CSI_syms-1;
%Total panjang frame aktual dengan stuffed bits
fr_len = sub_frame*sym_size + CSI_syms;
%Update nilai data_sym
data_sym = fr_len - CSI_syms;
%Hitung total frame data, hitung padding,
tambahkan bit stuffing
n_frames = ceil(n_syms/data_sym);

```

```

stuff_sym = [upsample(CSI_dat(1:CSI_syms-
1),sym_size+1);CSI_dat(end)];
n_dat_fr = repmat(stuff_sym,1,n_frames);
pad = n_frames*data_sym - n_syms;
%Tambahkan zero padding pada symbol
n_sym_dat = [n_sym_dat;zeros(pad,1)];
%Reshape n_sym_dat
n_sym_dat =
reshape(n_sym_dat,data_sym,n_frames);

%Bagi data menjadi beberapa frame, tambahkan bit
stuffing
for ii=1:n_frames
    n_dat_fr(:,ii) =
sym_stuffing(n_dat_fr(:,ii),n_sym_dat(:,ii),sym_
size);
end

%Tambahkan preamble
temp_mat1 = repmat(pream,1,n_frames);
xt_dat = [temp_mat1;n_dat_fr];

%Interpolasi, matched filtering, tambahkan
filter delay
xt_mf_bb =
filter(h_SRRC,[upsample(xt_dat,nsamp);zeros(flt_
delay,n_frames)]);
xt_mf = zeros(size(xt_mf_bb));

%Clear unused variables
clear temp_mat1 stuff_sym n_sym

%Upconvert semua frame, normalisasi
time = [(0:length(xt_mf)-1)/Fs].';
f = 5e6;
for ii=1:n_frames
    xt_mf(:,ii) =
xt_mf_bb(:,ii).*exp(1i*2*pi*f*time);
    norm_fact = max( [ max(real(xt_mf(:,ii))) ,
max(imag(xt_mf(:,ii))) ] );
    %Normalize frame

```

```

        xt_mf(:,ii) = xt_mf(:,ii)./norm_fact;
end

% fig_title='Power Spektral Density'
% [y0_psd,f0,y0_psd2,f02,aa,bb,cc] =
show_spectrum(xt_mf,xt_mf,Fs,fig_title);

```

Program 3

```

%%FRAME_RX
% File ini akan menjalankan proses demodulasi
hasil transmisi pada WARP.
% Proses demodulasi meliputi:
%   - Sinkronisasi
%   - Downconvert
%   - Matched Filtering
%   - Timing recovery (Preamble)
%   - Baseband demodulation
% Setelah proses baseband modulation, skema SIMO
dilakukan pada
% simbol-simbol yang diterima pada kanal yang
berbeda. Kemudian proses hard
% detection dilakukan, lalu perhitungan bit
error rate

%Sinkronisasi dan Downconvert semua frame
time = ((0:length(rx_IQ)-1)/Fs).';
rx_IQ_disp = rx_IQ;
for ii=1:n_frames
    %vco_sig = syn_frame(rx_IQ(:,ii),f,Fs);
    vco_sig = exp(1i*2*pi*f*time);
    rx_IQ(:,ii) = rx_IQ(:,ii).*conj(vco_sig);
end

%Sinkronisasi fasa

%Matched filtering
hrx_SRRC = design(SRRC_spec);
hrx_SRRC.numerator = hrx_SRRC.numerator *
(norm_factor*nsamp);

```

```

yt_mf =
filter(hrx_SRRC,[rx_IQ;zeros(flt_delay,n_frames)
]);

yt_rx_data = zeros(size(n_dat_fr));
z_sym = zeros(size(n_sym_dat));
ch_est = zeros(size(n_dat_fr));

%Deteksi simbol pertama pada tiap-tiap frame
for ii=1:n_frames
    temp_vct1 = yt_mf(:,ii);

    %Cari korelasi tertinggi
    correlation = abs( (temp_vct1(1:corr_win)')
* ref_matx );
    pream_start = find(correlation ==
max(correlation));
    first_sample = pream_start+length(pream_up);

    %Downsampling
    temp_vct2 = temp_vct1(first_sample:end);

    %Determine Maximum likelihood first optimum
sampling point
    %ML_samp = ML_first_sym(temp_vct2,nsamp);
    %Start sampling at initial point
    temp_vct3 =
downsample(temp_vct2(1:end),nsamp);

    %Trim
    temp_vct3 = temp_vct3(1:fr_len);

    %Save trimmed vector
    yt_rx_data(:,ii) = temp_vct3;

    %Estimasi kanal
    ch_est(:,ii) =
estimate_chan(yt_rx_data(:,ii),sym_size);

```



```

        %Hasil kali yr_rx_data dengan konjugat dari
        estimasi kanal
        %      yt_rx_data(:,ii) = yt_rx_data(:,ii).*exp(-
        li*angle(ch_est(:,ii)));

        %Received symbols:
        temp_vct3 =
        yt_rx_data(:,ii).*conj(ch_est(:,ii));
        multip = [abs(ch_est(:,ii)).^2];
        yt_rx_data(:,ii) = (temp_vct3)./multip;

        %Symbol de-stuffing
        temp_vct3 =
        sym_destuffing(yt_rx_data(:,ii),sym_size);

        %Potong semua frame CSI, kumpulkan hasil
        data pada matriks tertentu
        z_sym(:,ii) = temp_vct3;
    end

    %Save memory
    clear temp_vct1 temp_vct2 temp_vct3
    %Save more memory

    %Ubah yt_rx_data menjadi vektor, potong yt_syms
    yt_syms = reshape(z_sym,data_sym*n_frames,1);
    yt_syms = yt_syms(1:length(n_dat));

    %Demodulasi
    z_sym = demodulate(h_bb_demod,yt_syms);

    %Potong z_sym agar memiliki panjang sama dengan
    n_dat
    z_sym = z_sym(1:length(n_dat));
    rx_siso= z_sym;

    yy= de2bi(rx_siso,'left-msb');
    rx_bit=reshape(yy,1,[]);

    [num_err, SER_SISO] = biterr(z_sym,n_dat)

```

Lampiran D



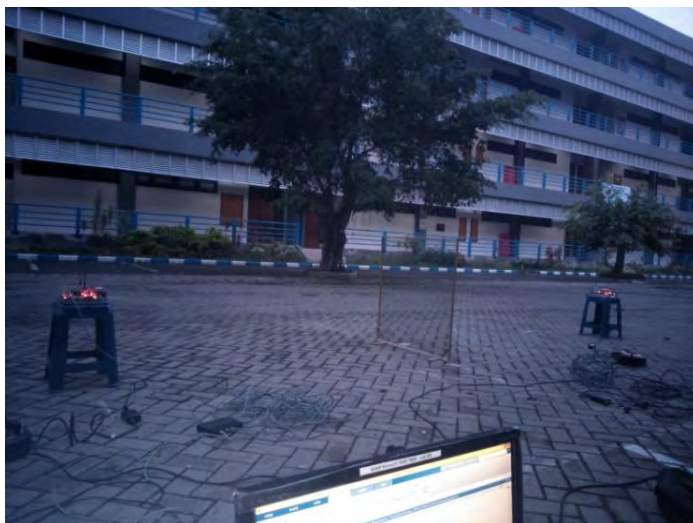
Gambar D.1 Pengukuran pada lingkungan Indoor dengan jarak 4 meter LOS



Gambar D.2 Pengukuran pada lingkungan *Outdoor* dengan jarak 4 meter LOS



Gambar D.3 Pengukuran pada lingkungan *Outdoor* dengan jarak 4 meter LOS



Gambar D.4 Pengukuran pada lingkungan *Outdoor* dengan jarak 4 meter NLOS

RIWAYAT HIDUP



Fanny Ananta Marpalinda dilahirkan di Padang pada tanggal 15 Juli 1992. Penulis merupakan anak pertama dari pasangan Irfan dan Sri Ewaldi, S.Pd. Penulis memulai pendidikan formal di SD N 32 Marapalam, Padang dari tahun 1997-2003, SMP N 7 Padang pada tahun 2003-2006, SMA N 7 Padang pada tahun 2006-2009. Setelah lulus SMA penulis melanjutkan studi D3 di Politeknik Negeri Jakarta, Jurusan Teknik Elektro, Program Studi Teknik Telekomunikasi pada tahun 2009-2012 dan pada tahun

2012 penulis melanjutkan studi strata 1 (S1) di Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Fakultas Teknologi Informasi, Jurusan Teknik Elektro Program Studi Telekomunikasi Multimedia. Penulis menulis buku ini sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Madhow, Upamanyu. *Fundamentals of Digital Communications*: New York : Cambridge University Press, 2008.
- [2]. Proakis, John G. “*Digital Communications 4th edition*”.s.1: McGraw-Hill Science. 2000
- [3]. Amiri, K., Sun, Y., Murphy, P., Hunter, C., Cavallaro, J. R., & Sabharwal, A. “WARP, a Unified Wireless Network Testbed for Education and Research”. IEEE International Conference on Microelectronic Systems Education. 2007
- [4]. Rappaport, Theodore S. “*Wireless Communication Principles and Practice*”. V-soft.net. 1996
- [5]. Wilson, Stephen G. “*Digital Modulation and Coding*”. Prentice-hall International. 1996
- [6]. K, Kisiel. D, Sahota. G, Swaminathan. “*Quadrature Amplitude Modulation : A simulation study*”. Simon Frasier University. Canada. 2005
- [7]. WARPLab 6 Framework overview. *WARP Project – Wireless Open Access Research Platform*. [Online] September 2014. [Disunting: September 12, 2014.] <http://warpproject.org/trac/wiki/WARPLab6>.
- [8]. Murphy, P., Subharwal, A., Aazhang, B., Design Of WARP, *A Wireless Open-Access Research Platform*. 5, 1-5
- [9]. WARP radio board overview - Wireless Open Access Research Platform. [Online] September 2014. [Disunting: September 12, 2014.]
- [10]. http://warpproject.org/trac/wiki/HardwareUsersGuides/RadioBoard_v1.4.
- [11]. Sklar, Bernard. “*Digital Communications Fundamentals and Applications 2^{end} edition*”.California: Prentice Hall.1987
- [12]. Sri Hartanto, 2010. Pengurangan Bit Error Pada Modulasi M-QAM Dalam Kanal Rayleigh Fading Dengan Teknik Spatial Multiplexing Dan Metode ZF-SIC, MMSE-SIC, Maximum Likelihood. Tesis. Universitas Indonesia
- [13]. Daniel Aspel, 2004. Adaptive Multilevel Quadrature Amplitude Radio Implementation in Programmable Logic. Thesis. University of Saskatchewan

Halaman ini sengaja dikosongkan

RIWAYAT HIDUP



Fanny Ananta Marpalinda dilahirkan di Padang pada tanggal 15 Juli 1992. Penulis merupakan anak pertama dari pasangan Irfan dan Sri Ewaldi, S.Pd. Penulis memulai pendidikan formal di SD N 32 Marapalam, Padang dari tahun 1997-2003, SMP N 7 Padang pada tahun 2003-2006, SMA N 7 Padang pada tahun 2006-2009. Setelah lulus SMA penulis melanjutkan studi D3 di Politeknik Negeri Jakarta, Jurusan Teknik Elektro, Program Studi Teknik Telekomunikasi pada tahun 2009-2012 dan pada tahun

2012 penulis melanjutkan studi strata 1 (S1) di Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Fakultas Teknologi Informasi, Jurusan Teknik Elektro Program Studi Telekomunikasi Multimedia. Penulis menulis buku ini sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana.

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dalam perkembangan transmisi data pada komunikasi bergerak dibutuhkan sistem yang memiliki keunggulan. Keunggulan itu bisa berupa efisiensi *bandwidth* yang lebih baik, *Bit Error Rate* (BER) yang rendah, kapasitas *user* yang banyak dan sebagainya. Teknik modulasi merupakan salah satu faktor yang menentukan keunggulan tersebut. Teknik modulasi digital telah dikembangkan penggunaannya secara luas dalam berbagai layanan komunikasi. Dengan modulasi digital, sinyal informasi dalam bentuk *binary digit* (bit-bit) dimodulasi dan dikirimkan melalui kanal komunikasi (saluran transmisi) untuk dapat disampaikan ke penerima. Idealnya sampai di penerima, semua urutan bit-bit diterima dengan benar dan tidak terjadi kesalahan pengiriman. Namun dalam prakteknya tidak semua bit-bit dapat diterima dengan benar. Dalam hal ini tidak dapat dihindari terjadinya kesalahan bit (*bit error*) saat bit bit informasi dikirimkan melalui kanal komunikasi.

Penyebab terjadinya *bit error* dapat berasal dari kondisi kanal komunikasi yang dipengaruhi oleh berbagai macam gangguan, baik dari dalam sistem itu sendiri, yang disebut bising (*noise*) dan gangguan dari luar sistem, yang dinamakan dengan interferensi (*interference*). *Noise* yang umum terjadi pada sistem komunikasi adalah *Additive White Gaussian Noise* (AWGN), yaitu *noise* dengan rapat daya konstan dan terdistribusi secara gaussian. Sedangkan interferensi dapat disebabkan oleh adanya fading. Fading terjadi karena perubahan sudut atau phase, polarisasi dan atau perubahan level sinyal terhadap waktu, sehingga sinyal yang diterima berubah dengan cepat. Perubahan periodik dari selubung satu komponen multipath atau selubung sinyal fading datar (*flat fading*) pada transmisi *No Line Of Sight* (NLOS) yang terdistribusi secara Rayleigh disebut dengan *Rayleigh Fading*.

Teknik modulasi M-QAM adalah salah satu teknik modulasi digital multi level yang saat ini banyak digunakan pada sistem komunikasi. Hal ini disebabkan karena konstelasi sinyal M-QAM yang tidak begitu rapat dan kemungkinan terjadinya *bit error* lebih kecil, bila dibandingkan dengan sistem modulasi lainnya seperti M-ary *Quadrature Phase Shift Keying* (M-QPSK). Teknik M-QAM akan diimplementasikan pada WARP secara nyata dan *real-time* untuk mengetahui seberapa besar kemampuan M-QAM bekerja pada WARP. WARP didesain untuk memenuhi riset sistem komunikasi nirkabel dengan kinerja yang tinggi. WARP mempunyai WARPLab yang merupakan salah satu dari *software defined radio* (SDR), dimana sistem

komunikasi M-QAM ini diimplementasikan pada WARP untuk meminimalisasi kesalahan yang terjadi, karena SDR bersifat *programmable* yang dapat di-*program* ulang dan fleksibel.

1.2 Perumusan Masalah

Masalah yang diharapkan untuk ditemukan solusinya melalui tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Seberapa baik kinerja teknik modulasi M-QAM pada lingkungan *indoor*
2. Seberapa baik kinerja teknik modulasi M-QAM pada lingkungan *outdoor*
3. Sampai orde berapa teknik modulasi M-QAM dapat diimplementasikan pada WARP.

1.3 Batasan Masalah

Untuk menyelesaikan permasalahan-permasalahan yang ada, maka dalam prakteknya akan dibatasi seperti:

1. Matlab yang digunakan merupakan matlab versi 2012.
2. WARP yang digunakan merupakan WARP versi 7.1
3. Modulasi yang digunakan yaitu M-QAM.
4. Daerah pengukuran dibatasi dalam lingkungan *indoor* dan *outdoor*.

1.4 Tujuan Tugas Akhir

Tujuan dan capaian yang diharapkan tercapai setelah selesainya tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui kualitas unjuk kerja teknik M-QAM pada lingkungan *indoor*
2. Mengetahui kualitas unjuk kerja teknik M-QAM pada lingkungan *outdoor*
3. Mengetahui sampai orde berapa M-QAM dapat bekerja pada *platform* WARP

1.5 Metodologi Penelitian

Metodologi yang digunakan pada pengerjaan tugas akhir ini dijabarkan dengan diagram alir pada Gambar 1.1. Metode yang dijabarkan diatas bisa digolongkan sebagai berikut:

1. Studi Pustaka
Untuk teori yang dijadikan rujukan berkaitan dengan materi

yang dibahas pada tinjauan pustaka. Studi pustaka juga akan mengambil sumber-sumber yang berkaitan dengan:

- Teori-teori yang dijabarkan pada bagian ruang lingkup tugas akhir
- Simulasi sistem komunikasi
- Desain teknik modulasi digital
- Desain penerima digital
- Referensi pemrograman modul WARP
- Referensi WARPLab

2. Perumusan parameter unjuk kerja dan metode pengukurannya

Sebelum proses pengukuran bisa berjalan, parameter performansi, yaitu yang menunjukkan kualitas unjuk kerja sistem komunikasi, dirumuskan dan ditentukan metode pengukurannya. Pada tahapan ini, akan ditentukan misalnya, band frekuensi pengukuran, informasi yang akan dipancarkan, jumlah-jumlah bit yang akan ditransmisikan, kondisi frame yang dipancarkan, proses pengukuran kanal khususnya untuk metode MRC. Parameter yang diambil sebagai acuan performansi adalah *bit error rate* (BER).

3. Simulasi sistem komunikasi

Proses simulasi sistem komunikasi dilakukan dengan menguji kinerja dari M-QAM. Proses simulasi menggunakan MATLAB. Proses simulasi ini untuk menentukan algoritma yang digunakan pada saat pengukuran. Simulasi juga bertujuan untuk memastikan algoritma yang digunakan sesuai dengan teori sistem komunikasi.

4. Implementasi pada modul WARP

Simulasi akan diterapkan pada modul WARP namun dengan kondisi lingkungan indoor yang real. Proses implementasi dilakukan dengan menggunakan *software* WARPLab.

5. Pengukuran pada lingkungan indoor

Setelah modul WARP bisa digunakan untuk simulasi dengan kondisi kanal real, maka proses pengukuran dapat dilakukan. Pada tahapan ini, dilakukan pengumpulan data untuk berbagai kondisi parameter yang ditentukan, misalnya, berbagai macam modulasi digital, daya pancar yang berbeda untuk jarak tertentu, komunikasi LoS (*Line-of-Sight*) dan nLOS (*non Line-of-Sight*) dan ukuran ruangan tertentu. Tujuan akhirnya adalah menentukan seberapa baik unjuk kerjanya yang ditunjukkan oleh BER.

6. Proses analisa data dan pengambilan kesimpulan

Analisa data dan pengambilan kesimpulan mengacu pada data hasil pengukuran.

7. Dokumentasi penelitian

Tahapan akhir ini meliputi pembuatan laporan tugas akhir dan penulisan jurnal ilmiah. Pembuatan laporan tugas akhir untuk beberapa bagian dilakukan bersesuaian dengan pengerjaan tahapan-tahapan diatas. Sedangkan jurnal ilmiah dilakukan setelah laporan tugas akhir selesai.

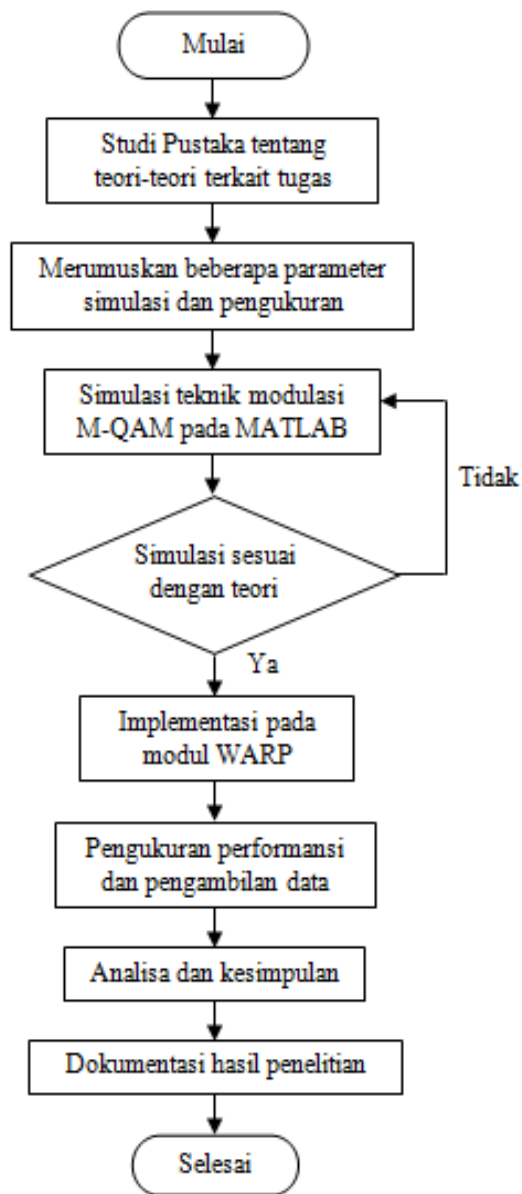
1.6 Sistematika Penelitian

Proses penelitian yang tersusun dalam laporan tugas akhir dapat dijabarkan sebagai berikut:

- BAB 1, Bagian ini akan membahas tentang latar belakang, tujuan dan permasalahan-permasalahan yang dihadapi dan hasil akhir yang diinginkan dalam pengerjaan tugas.
- BAB 2, Bagian ini melakukan mengenai tema-tema terkait yang membantu dalam proses perumusan masalah sistem. Tema-tema tersebut juga digunakan sebagai acuan awal dalam penyelesaian permasalahan.
- BAB 3, Bagian ini membahas tentang proses desain sistem, kendala-kendala serta penyelesaiannya dalam bentuk implementasi pada alat.
- BAB 4, Bagian ini akan membahas mengenai sistematika pengukuran dan hasilnya. Pada bab tersebut juga dilakukan analisis awal terhadap data-data hasil pengukuran.
- BAB 5, Bagian ini akan membahas kesimpulan dan saran berdasarkan hasil-hasil analisa pada bab 4 sebelumnya.

Manfaat yang diharapkan tercapai pada proses penelitian ini adalah sebagai berikut:

- Mengetahui kendala-kendala dalam proses desain sistem komunikasi dan bagaimana cara menyelesaikannya
- Memahami cara kerja sistem komunikasi SISO
- Memberikan kontribusi tentang proses desain dan implementasi modulasi M-QAM pada WARP



Gambar 1.1 Diagram Alir Pengerjaan Tugas Akhir

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB II

TEORI PENUNJANG

Pada bab ini akan dijabarkan dasar teori yang menjadi acuan dalam pengerjaan penelitian. Pembahasan teori dalam bab 2 memiliki tujuan antara lain:

2.1 Karakteristik Komunikasi Digital

Komunikasi digital adalah komunikasi berbasis sinyal digital yang bentuk sinyalnya terputus-putus (diskrit) dan menggunakan sistem bilangan biner. Bilangan biner tersebut akan membentuk kode-kode yang merepresentasikan suatu informasi tertentu. Komunikasi digital memiliki kelebihan dibandingkan dengan komunikasi analog, antara lain dalam meminimalisasi *noise* dan atau inteferensi. *Noise* merupakan sinyal yang tidak diharapkan dalam sistem telekomunikasi dan bersifat mengganggu serta kehadirannya tidak bisa ditentukan. *Noise* selalu ada dalam setiap sistem telekomunikasi, khususnya pada sistem transmisi. Selama proses transmisi, sinyal informasi yang ditransmisikan akan dipengaruhi oleh *noise* yang bisa mengakibatkan terjadinya *error* atau kesalahan pada penerima (*receiver*).[1]

2.1.1 Data Rate Dan Bandwidth

Sangatlah penting untuk mengidentifikasi perbedaan antara *data rate* (*d*) dan *bandwidth* (*B*) sinyal dalam sistem transmisi. Perbedaan definisi dari kedua parameter tersebut adalah sebagai berikut:

1. *Data Rate* adalah jumlah bit yang ditransmisikan tiap detik. Sebagai contohnya, *data rate* 1 Mbps berarti sistem mampu mentransmisikan data 1 Mega bit tiap detik.
2. *Bandwidth* sinyal didefinisikan sebagai lebar jalur dimana daya sinyal terkonsentrasi. Sebagai contohnya, *bandwidth* dapat didefinisikan sebagai bagian dimana 99% sinyal terkonsentrasi di bagian tersebut.

Berdasarkan definisi di atas, terlihat bahwa *bandwidth* berbanding lurus dengan *bit rate*. Jika *bit rate* tinggi, *T_b* kecil dan *bandwidth* menjadi sangat lebar. Hal ini berarti sistem komunikasi dengan *data rate* yang tinggi harus mampu menyediakan *range* frekuensi yang lebar pula.

Apabila data yang dikirimkan dalam sebuah sistem komunikasi ideal memiliki frekuensi (f) = 1 MHz dan $T = 1/f = 1/1.10^6 = 1 \mu s$, maka *bandwidth* sinyalnya adalah $4 \times 1 \text{ MHz} = 4 \text{ MHz}$, dan kecepatan data (*data rate*) nya adalah $2 \times 1 \text{ MHz} = 2 \text{ Mbps}$. Jika sebuah data memiliki frekuensi 2 MHz dan $T = 1/f = 1/2.10^6 = 0.5 \mu s$ maka *bandwidth*

sinyalnya adalah $4 \times 2 \text{ MHz} = 8 \text{ MHz}$, dan kecepatan data (*data rate*) nya adalah $2 \times 2 \text{ MHz} = 4 \text{ Mbps}$. Dengan demikian hubungan *data rate* (d) dan *bandwidth* (b) dapat dinyatakan sebagai

$$B = 4 f = 2d \quad (2.1)$$

Nyquist menyatakan bahwa bila kecepatan transmisi adalah $2B$, maka suatu sinyal dengan frekuensi tidak lebih besar daripada B , cukup memadai untuk menghasilkan kecepatan sinyal. Kebalikannya juga berlaku, suatu *bandwidth* sebesar B , maka kecepatan sinyal tertinggi yang bisa dihasilkan adalah sebesar $2B$. Keterbatasan ini dikarenakan efek *intersymbol interference*, seperti misalnya yang disebabkan oleh *delay distorsi*. Hasilnya berguna untuk pengembangan skema pengkodean digital ke analog. Jadi untuk *bandwidth* tertentu, *data rate* dapat ditingkatkan dengan cara meningkatkan jumlah elemen-elemen sinyal yang berlainan. Bagaimanapun hal ini menambah beban pada *receiver*. [1][2]

2.1.2 Jumlah Bit Error

Jumlah *bit error* merupakan jumlah bit salah yang diterima dibagi dengan jumlah bit yang dikirimkan, mengikuti ketentuan sebagai berikut:

$$\text{Jumlah Bit Error} = \frac{eb}{tb} \quad (2.2)$$

Dimana:

eb = jumlah bit yang salah (*bit error rate*)

tb = jumlah bit total yang dikirimkan

Sebagai contoh, terdapat sejumlah urutan bit yang dikirimkan, yaitu: 0 1 1 0 0 0 1 0 1 1 (sebanyak 10 bit), yang kemudian setelah melalui kanal komunikasi urutan bit yang diterima menjadi 0 0 1 0 1 0 1 0 0 1 (terjadi *bit error* sebanyak 3 bit). Dengan demikian, kemungkinan jumlah *bit error* pada contoh tersebut dapat dihitung sebagai berikut:

$$\text{Jumlah Bit Error} = \frac{3}{10} = 0,3 \text{ atau } 30\%.[5]$$

2.1.3 Kapasitas Kanal Komunikasi

Untuk data digital permasalahan yang muncul adalah gangguan kanal komunikasi yang dapat membatasi *data rate* dan *data rate* maksimum yang dapat ditransmisikan melalui suatu kanal komunikasi.

Ada empat konsep tentang kanal komunikasi, yaitu:

1. *Data rate*, merupakan jumlah data pada kanal komunikasi dalam bit per detik
2. *Bandwidth*, merupakan lebar kanal komunikasi dari sinyal yang ditransmisikan

3. *Noise*, merupakan level rata-rata derau sepanjang kanal komunikasi
4. *Error Rate*, merupakan jumlah *error* yang terjadi pada kanal komunikasi

Pernyataan Nyquist tentang *bandwidth* dapat dihubungkan dengan kapasitas kanal komunikasi yang dikemukakan oleh Claude Shannon. Untuk level derau tertentu, daya sinyal yang lebih besar akan meningkatkan kemampuan penerimaan data secara benar di dalam derau. Dalam hal ini, *signal to noise ratio* (SNR) merupakan perbandingan daya suatu sinyal terhadap daya *noise* yang muncul pada titik tertentu dalam transmisi. Biasanya, SNR diukur pada sebuah penerima, karena nantinya digunakan untuk memproses sinyal yang diterima dan menghilangkan derau yang tidak diinginkan dengan persamaan:

$$(SNR)_{dB} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_s}{P_n} \right) \quad (2.3)$$

Dimana:

P_s = *Power Signal* (daya sinyal)

P_n = *Power Noise* (daya bising)

SNR digunakan untuk menentukan batas atas terhadap jumlah data yang mampu diperoleh dari kanal komunikasi. Shannon mengemukakan bahwa kapasitas kanal komunikasi maksimum, dalam bit per detik, ditentukan dengan persamaan sebagai berikut:

$$C = B \log_2 (1 + SNR) \quad (2.4)$$

Dimana:

C = kapasitas kanal komunikasi dalam bit per detik

B = *bandwidth* kanal komunikasi dalam Hertz

Persamaan Shannon tersebut menggambarkan nilai maksimum teoritis yang dapat dicapai oleh sistem komunikasi. Sedangkan pada prakteknya, bagaimanapun juga jumlah data yang dapat ditransmisikan lebih rendah dari ketentuan Shannon tersebut. Satu alasan untuk hal ini adalah ketentuan Shannon tersebut berasumsi hanya pada *white noise* (derau suhu) saja. Batasan Shannon adalah bahwa kapasitas kanal komunikasi C tidak boleh lebih kecil dari jumlah informasi yang akan dikirimkan.

Untuk level derau tertentu, *data rate* dapat ditingkatkan, baik dengan cara meningkatkan daya sinyal atau meningkatkan *bandwidth*-nya. Bagaimanapun juga saat daya sinyal meningkat, maka akan

meningkat pula efek sifat nonlinear di dalam sistemnya, sekaligus meningkatkan derau intermodulasinya.[4]

2.2 Modulasi Digital

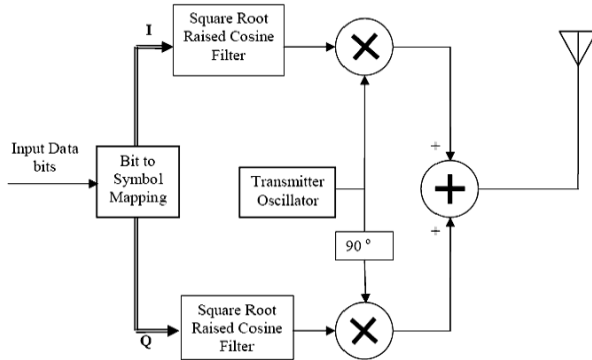
Modulasi adalah proses pengkodean informasi dari sumber pesan dengan cara transmisi yang cocok. Hal ini biasanya melibatkan menerjemahkan sinyal pesan *baseband* (disebut sumber) ke sinyal *baseband* pada frekuensi yang sangat tinggi bila dibandingkan dengan frekuensi *baseband*. Sinyal *baseband* disebut sinyal termodulasi dan sinyal pesan *baseband* yang disebut sinyal modulasi. Modulasi dapat dilakukan dengan memberikan variasi amplitudo, fase, atau frekuensi pembawa, frekuensi tinggi sesuai dengan amplitudo sinyal pesan. Demodulasi adalah proses pengambilan pesan *baseband* dari operator sehingga dapat diproses dan ditafsirkan oleh penerima yang dituju (juga disebut sink). Pemilihan jenis modulasi yang digunakan ditentukan oleh penerapan yang diinginkan, termasuk juga karakteristik kanal yang digunakan seperti *bandwidth* yang tersedia dan kerentanan (*susceptibility*) kanal terhadap perubahan (*fading*).

Untuk mengirim pesan digital, sistem modulasi digital mengalokasikan waktu interval sinyal dan menghasilkan fungsi kontinyu yang mewakili simbol. Dalam modulasi digital, pesan sinyal diubah menjadi sinyal *baseband*. Pada sistem komunikasi nirkabel, bagian kedua dari modulasi adalah mengubah sinyal *baseband* ke frekuensi radio (RF) sinyal, dan memodulasi *phase*, frekuensi atau amplitudo dari sinyal pembawa (*carrier*). Sedangkan pada sistem kabel, *sinyal baseband* dapat dikirimkan secara langsung tanpa modulasi sinyal pembawa (misalnya dalam jaringan LAN).[2][5]

2.2.1 *M-ary Quadrature Amplitude Modulation* (M-QAM)

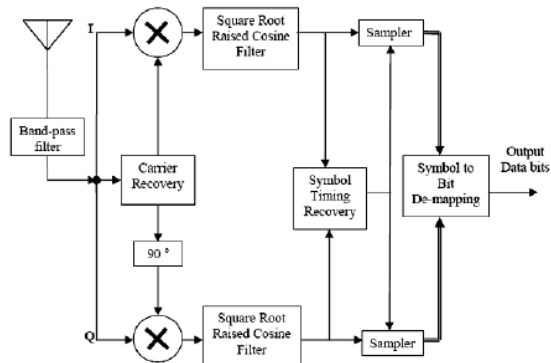
M-ary Quadrature Amplitude Modulation (M-QAM) merupakan salah satu teknik modulasi digital multi level yang saat ini banyak digunakan pada sistem komunikasi. Hal ini disebabkan karena konstelasi sinyal M-QAM yang tidak begitu rapat, bila dibandingkan dengan sistem modulasi lainnya, misalnya dengan sistem *M-ary Quadrature Phase Shift Keying* (M-QPSK).[2][6]

Blok diagram yang menjelaskan proses modulasi M-QAM ditunjukkan pada Gambar 2.1 sebagai berikut.



Gambar 2.1 Proses Modulasi M-QAM

Sedangkan blok diagram yang menjelaskan proses demodulasi M-QAM ditunjukkan pada Gambar 2.2 sebagai berikut.



Gambar 2.2 Proses Demodulasi M-QAM

2.2.2 Penentuan Amplitudo Sinyal

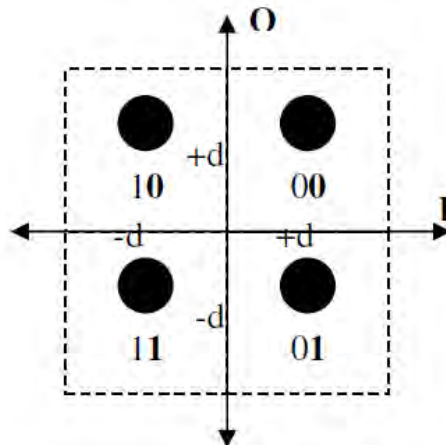
Pada proses modulasi M-QAM, aliran bit-bit pertama kali dipetakan dengan *Gray Mapping* (*Gray Coding*) ke dalam koordinat konstelasi sinyal biner *In-phase* (I) dan *Quadrature* (Q) seperti Gambar 2.1, sedangkan sebaliknya pada proses demodulasi M-QAM, aliran sinyal-sinyal analog akhirnya dikembalikan menjadi sinyal-sinyal biner dengan menggunakan *Gray Mapping*. M adalah jumlah multilevel modulasi atau jumlah maksimum data pada M-QAM dalam bentuk bit.

Untuk sistem modulasi 4-QAM dapat dikirimkan 4 data dalam biner, sedangkan untuk 64 QAM dapat dikirimkan 64 data dalam biner. Jumlah untaian biner yang dapat mempresentasikan data disebut dengan ukuran konstelasi bit, disimbolkan dengan k , dan dapat dinyatakan sebagai:[6]

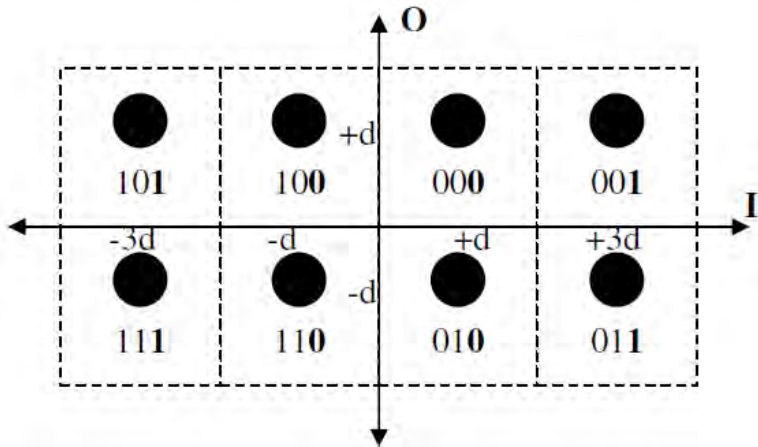
$$k = \log_2 M \quad (2.5)$$

2.2.3 Gray Mapping (Gray Coding)

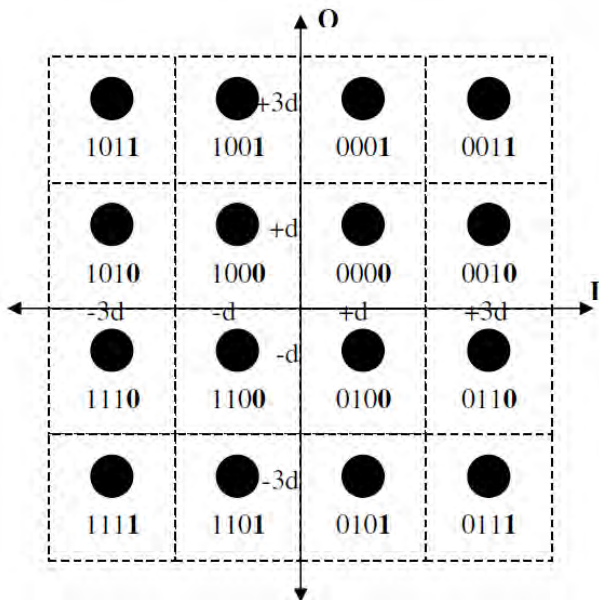
Pemetaan sinyal pada modulasi M-QAM dengan *Gray Mapping* (*Gray Coding*) dapat dilakukan dengan mengkombinasikan sisi tegak *Quadrature* (Q) dan sisi sudut *In-phase* (I) konstelasi sinyal. Angka-angka yang secara umum digunakan untuk menyatakan nilai Am_Q sebagai sisi tegak Q dan nilai Am_i sebagai sisi sudut I adalah konstanta d . Untuk modulasi 4-QAM, terdapat pasangan $(d, -d)$ dimana nilai d menyatakan bit 0 dan $-d$ menyatakan bit 1. Untuk 8-QAM pada sisi sudut I ditambahkan nilai $(-3d, +3d)$, dimana pada penambahan titik $-3d$ dan $+3d$, ditambahkan bit 1, sedangkan pada $-d$ dan $+d$, ditambahkan bit 0. Untuk 16-QAM pada sisi tegak Q dan sisi sudut I ditambahkan nilai $(-3d, +3d)$, dimana pada penambahan titik $-3d$ dan $+3d$ di sisi tegak Q ditambahkan bit 1, sedangkan pada $-d$ dan $+d$ ditambahkan bit 0. Untuk 32-QAM, pada sisi sudut I ditambahkan nilai $(-5d, +5d)$ dan $(-7d, +7d)$, sedangkan pada 64-QAM pada sisi sudut I dan sisi tegak Q ditambahkan nilai $(-5d, +5d)$ dan $(-7d, +7d)$, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.3, Gambar 2.4, Gambar 2.5, dan Gambar 2.6 sebagai berikut.



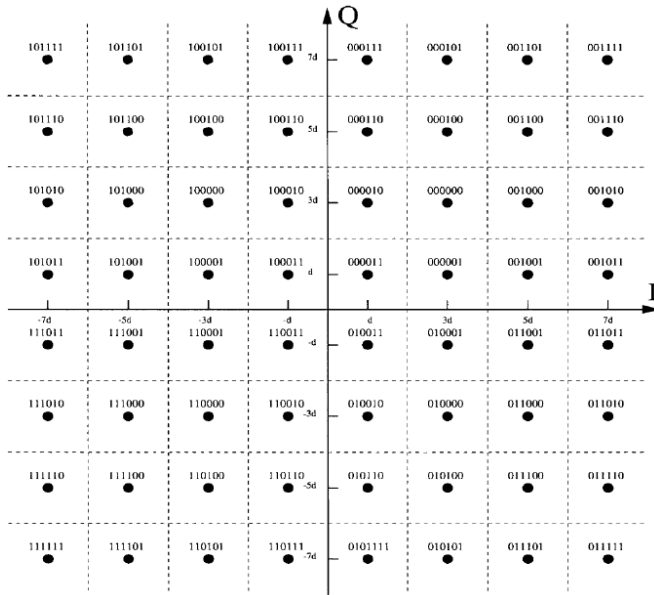
Gambar 2.3 Konstelasi sinyal 4-QAM



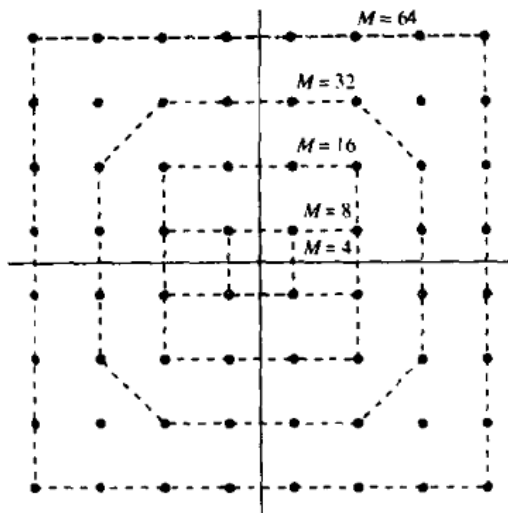
Gambar 2.4 Konstelasi sinyal 8-QAM



Gambar 2.5 Konstelasi sinyal 16-QAM



Gambar 2.6 Konstelasi sinyal 64-QAM



Gambar 2.7 Diagram ruang sinyal untuk rectangular QAM [2]

2.2.4 Probabilitas Error Pada M-QAM

Pada M-QAM sinyal hasil modulasi M-QAM dapat dinyatakan ke dalam persamaan

$$S_m(t) = A_{mc}g(t)\cos 2\pi f_c t - A_{ms}g(t)\sin 2\pi f_c t, \quad 0 \leq t \leq T \quad (2.6)$$

Dimana A_{mc} dan A_{ms} adalah amplitudo sinyal dari sinyal pembawa *quadrature* dan $g(t)$ adalah pulsa sinyal. Untuk menentukan probabilitas kesalahan (*error*) pada QAM, kita harus menetapkan sinyal ke dalam titik konstelasi. Pertama melihat sinyal 4-QAM dengan $M = 4$. Gambar 2.8 menggambarkan dua konstelasi 4-QAM. Gambar 2.8 (a) adalah empat fasa sinyal modulasi dan Gambar 2.8 (b) adalah sinyal 4-QAM dengan dua level amplitudo yaitu A_1 dan A_2 , dan empat fasa. Karena probabilitas *error* didominasi oleh jarak minimum antara titik pada konstelasi, maka dapat menentukan kondisi dengan $d_{\min}(e) = 2A$ untuk konstelasi sinyal. Dan juga menentukan nilai daya transmisi rata-rata, dengan alasan semua titik sinyal memungkinkan. Untuk 4 fasa sinyal, digunakan persamaan 2.7.

$$P_{av} = \frac{1}{4}(4)2A^2 = 2A^2 \quad (2.7)$$

Untuk dua amplitudo, empat fasa 4-QAM diletakkan titik-titik pada lingkaran. Dimana $d_{\min}(e) = 2A$ sehingga daya transmisi rata-rata sinyal adalah

$$P_{av} = \frac{1}{4}[2(3A^2) + 2A^2] = 2A^2 \quad (2.8)$$

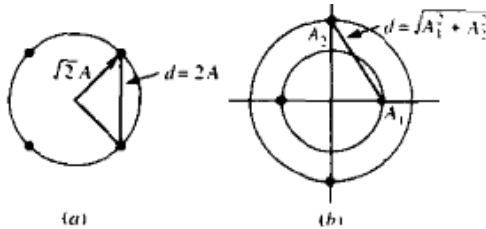
Dimana konstelasi sinyal untuk 4-QAM fasa, memiliki *error rate* yang sama untuk kedua sinyal pada Gambar 2.8.[2]

Dengan kata lain tidak ada keuntungan dari dua amplitudo sinyal 4-QAM untuk fase modulasi. Selanjutnya untuk $M=8$ QAM, pada kasus ini banyak kemungkinan konstelasi sinyal, dapat dilihat pada Gambar 2.9. dari empat gambar pada Gambar 2.9 mempunyai dua amplitudo dan memiliki jarak titik minimal dari $2A$. Dengan koordinat (A_{mc} , A_{ms}) untuk beberapa titik sinyal dinormalisasi A . Diasumsikan titik sinyal sama-sama mungkin, maka daya transmisi rata-rata sinyal dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (2.9)

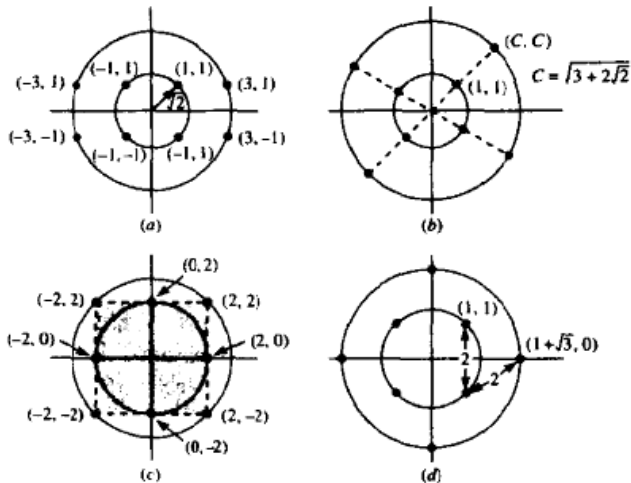
$$P_{av} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M (A_{mc}^2 + A_{ms}^2)$$

$$P_{av} = \frac{A^2}{M} \sum_{m=1}^M (a_{mc}^2 + a_{ms}^2) \quad (2.9)$$

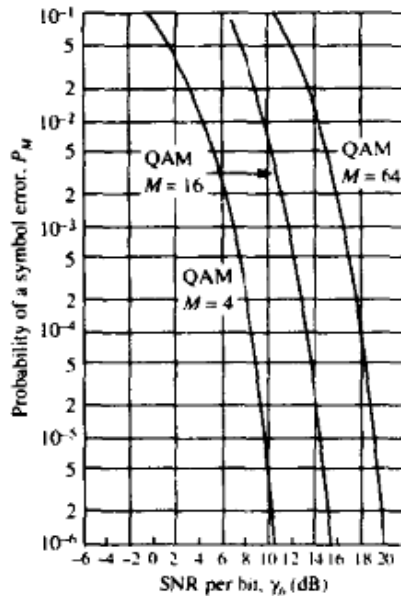
Dimana (A_{mc}, A_{ms}) adalah koordinat dari titik sinyal yang dinormalisasi A. Untuk Gambar 2.9 (a) dan (c) memiliki titik dengan bentuk rectangular dan memiliki $P_{av} = 6A^2$. Dan untuk Gambar 2.9 (b) memiliki rata-rata daya transmisi sebesar $P_{av} = 6,38A^2$ dan (d) $P_{av} = 4,73A^2$. Oleh karena itu sinyal (d) pada Gambar 2.9 membutuhkan daya kira-kira 1 dB lebih kecil dibandingkan (a) dan (b) dan 1,6 lebih sedikit dibandingkan (c) untuk mencapai probabilitas *error* yang sama.[2] Untuk grafik perbandingan probabilitas *error* untuk M-QAM dapat dilihat pada Gambar 2.10



Gambar 2.8 Dua konstelasi sinyal QAM dengan $M=4$ [2]



Gambar 2.9 Empat konstelasi sinyal untuk 8-QAM[2]



Gambar 2.10 Grafik probabilitas *error* simbol M-QAM [2]

2.3 Filter Raised Cosine

Pada saat pulsa-pulsa kotak dilewatkan melalui kanal *bandlimited*, pulsa akan menyebar dalam *domain* waktu dan pulsa untuk setiap simbol akan terdistorsi dalam *interval* waktu dari urutan simbol yang berturut-turut. Hal ini akan menimbulkan ISI (*Intersymbol Interference*) dan akan menunjukkan peningkatan probabilitas *error* pada penerima dalam mendeteksi simbol. Salah satu cara untuk meminimalisasi ISI adalah dengan meningkatkan kanal *bandwidth*. Ada beberapa teknik pembentukan pulsa yang digunakan untuk mengurangi efek ISI dan lebar spektrum dari sinyal digital termodulasi. Salah satunya adalah *filter raised cosine*.

Filter raised cosine merupakan *filter* yang paling populer yang sering digunakan dalam sistem komunikasi digital. *Filter raised cosine* masuk dalam kelompok *filter* yang memenuhi kriteria *nyquist* yang merupakan implementasi dari sebuah *filter Nyquist low-pass*. Spektrum *filter* ini menunjukkan simetri ganjil $1/2T$, dimana T merupakan periode simbol sistem.

Dalam pemrosesan sinyal, *filter root raised cosine* atau *square root raised cosine* sering digunakan sebagai filter dalam *transmit* dan

receive dalam sistem komunikasi digital untuk melakukan *matched filtering*. Hal ini membantu dalam meminimalkan ISI. Filter *root raised cosine* atau *square root raised cosine* diperoleh dari akar respon frekuensi filter *raised cosine* dinyatakan pada persamaan (2.10) atau (2.11).

$$H_{rc}(f) = H_{rrc}(f) \cdot H_{rrc}(f) \quad (2.10)$$

$$|H_{rrc}(f)| = \sqrt{|H_{rc}(f)|} \quad (2.11)$$

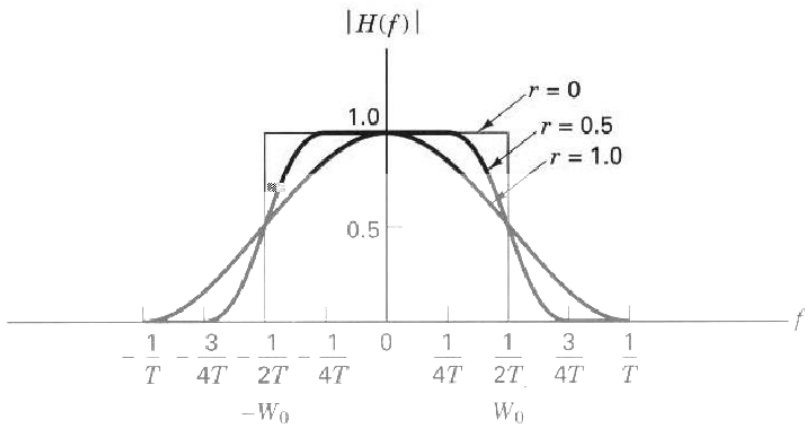
Pada sisi penerima, dilakukan proses demodulasi dan *sampling* serta deteksi untuk mendapatkan estimasi informasi yang dikirimkan. Proses demodulasi dan *sampling* bertujuan untuk mengembalikan gelombang dan mempersiapkan sinyal yang diterima untuk dideteksi.

Pada proses ini terdapat proses *matched filter* yang bertujuan untuk meningkatkan daya sinyal terhadap daya *noise* (SNR) dan proses *equalizer* untuk menurunkan ISI.

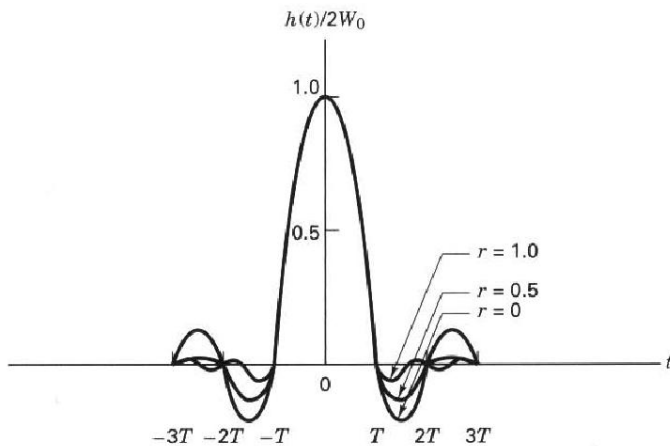
Sifat-sifat dari *Matched Filter* adalah :

1. Transformasi Fourier dari *output matched filter* yang *matched* dengan sinyal *input*, kecuali faktor *delay* waktu, sebanding dengan energy spectral density dari sinyal *input*.
2. Sinyal *output matched filter* sebanding dengan versi geseran dari fungsi otokorelasi dari sinyal *input* yang mana *filter matched* dengannya.
3. SNR *output matched filter* tergantung hanya pada rasio energi sinyal terhadap PSD dari *white noise* pada *input filter*.
4. Dua kondisi *matching* pada operasi *matched filtering* adalah
 - *Phase spectral matching* menghasilkan puncak *output* pada waktu T.
 - *Amplitudo spectral matching* memberikan SNR optimum pada harga puncak.

Proses deteksi adalah melakukan estimasi simbol yang telah dikirim berdasarkan hasil sample simbol terima, sinyal yang diterima diubah ke vektor- vektor dan sinyal yang berjarak minimum dengan sinyal terima diestimasi sebagai sinyal yang telah dikirimkan. Untuk *transfer function* sistem dan *impulse response* sistem dapat dilihat pada Gambar 2.11 dan Gambar 2.12.



Gambar 2.11 *Transfer Function Sistem*



Gambar 2. 12 *Impulse Response Sistem*

$H(f)$ = frequency transfer functoin

r = roll off factor

$h(t)$ = system impulse response

W_0 = Bandwidt Nyquist minimum untuk spektrum *rectangular*

W = Bandwidth Absolute

2.4 Teknik Estimasi BER (Bit Error Rate)

Terdapat beberapa cara untuk menentukan estimasi BER dalam simulasi komputer, diantaranya adalah :

1. Metode Monte Carlo
2. Metode Modifikasi Monte Carlo (Importance Sampling)
3. Teori Harga Ekstrem
4. Tail Extrapolation
5. Quasi-Analitical

Masing-masing metode di atas mempunyai kelebihan dan kekurangan diantaranya dibedakan oleh cara penanganan dari fungsi rapat atau distribusi peluangnya.

Metode Monte Carlo merupakan metode simulasi estimasi BER yang relatif sederhana, tetapi memerlukan waktu komputasi yang relatif lama, disebabkan oleh jumlah pengamatan yang diperlukan agar memenuhi keandalan estimasi tertentu.

2.5 Software Defined Radio (SDR)

Software Defined Radio (SDR) atau dapat disebut pula dengan *software-radio* merupakan suatu teknologi untuk membangun sistem radio yang fleksibel, *multi-service*, *multi-standard*, *multi-band*, *re-configurable* dan *re-programmable* dengan menggunakan *software*. Penggunaan SDR bertujuan untuk mengurangi penggantian *hardware* secara terus-menerus sehingga lebih menghemat biaya. Radio digunakan pada peralatan *wireless communication* dimana *software* melakukan implementasi fungsi *physical layer* dan *link layer*. Hal ini sesuai untuk peralatan *single wireless* yang kemudian diprogram ulang menggunakan modulasi yang berbeda, *coding* dan protokol akses. Fungsi utama dari *software* adalah dapat diprogram untuk standar yang ada secara fleksibel. Selain itu juga dapat di-*update* secara dinamis dengan *software* baru tanpa banyak mengubah *hardware* dan infrastruktur yang sudah ada.

Fleksibilitas dari sebuah sistem SDR terlihat dari kapabilitasnya untuk dioperasikan pada lingkungan *multiservice* tanpa terikat pada standar-standar terpisah, akan tetapi masih dapat menawarkan (secara teoritis) pelayanan-pelayanan dari beberapa sistem standar yang telah ada maupun sistem-sistem yang akan datang untuk segala *band* frekuensi.

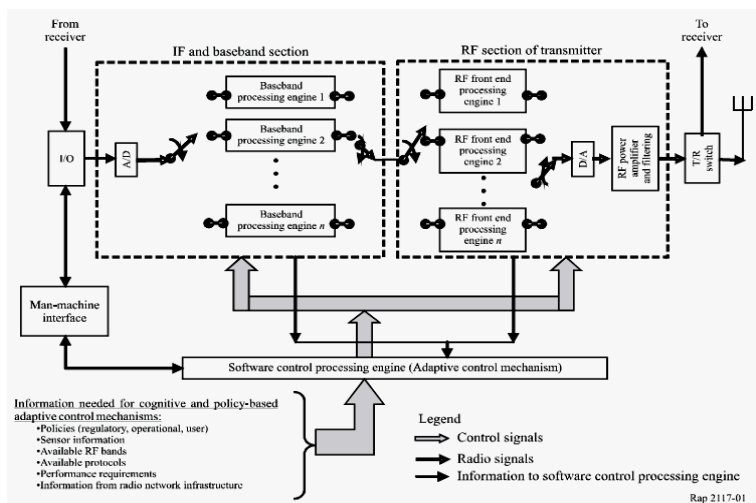
Pada perancangan SDR perlu diperhatikan dua hal yang menjadi acuan pokok yaitu:

1. Implementasi pada fungsi-fungsi *baseband*, seperti *coding*, modulasi, ekualisasi dan *pulse shaping*.

2. Sistem yang dapat diprogram ulang untuk menggaransi operasi – operasi pada *multistandard*.

Selain itu SDR juga dapat membangun suatu modem yang kompleks dengan program, *hardware* yang sudah ada dan juga komponen-komponen radio. Adapun arsitektur penyusun yang dimiliki teknologi SDR dapat dilihat pada Gambar 2.13.

Pada dasarnya arsitektur SDR terdiri atas perangkat keras untuk proses *baseband*, pengolahan sinyal, elemen yang mendukung konversi RF dan teknologi yang dipakai. Komponen yang digunakan untuk *baseband processing engine* bisa menggunakan *General Purpose Processors* (GPP), *Digital Signal Processor* (DSP), dan *Field Programmable Gate Array* (FPGA). Komponen tersebut didukung oleh *Application Programming Interface* (API) dari sistem perangkat lunak radio. Sistem yang dibangun berdasarkan standar arsitektur SDR dari ITU-R M.2117 memiliki keuntungan yaitu lebih ekonomis dari sisi perangkat keras dan perangkat lunaknya.



Gambar 2.13 Arsitektur SDR

2.6 Wireless Open Access Research Platform (WARP)

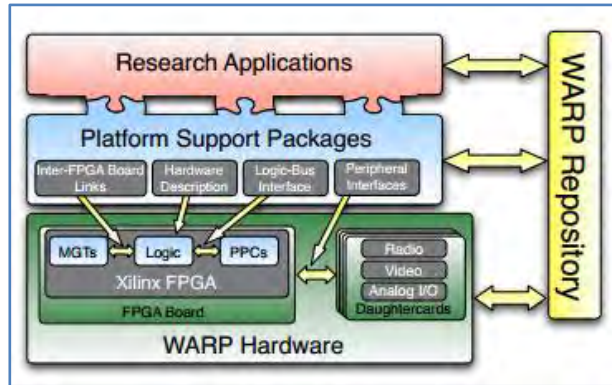
Wireless Open-Access Research Platform (WARP), merupakan sebuah modul FPGA yang telah dipersiapkan untuk melakukan proses implementasi algoritma nirkabel yang canggih. Platform ini memiliki banyak keunggulan, salah satunya adalah WARP dibuat dengan disain perangkat keras khusus, mengintegrasikan sumber daya pengolahan

berbasis FPGA dengan antar muka radio nyata. Selain itu *platform* ini didukung dengan modul khusus yang memudahkan pengguna dari berbagai pengolahan *hardware* dan sumber daya peripheral. *Platform* ini juga mendukung modul-modul digunakan untuk membangun berbagai aplikasi penelitian, termasuk implementasi *real time* dari *physical layer* dan *MAC layer*. [3][8]

2.6.1 Arsitektur *Platform* [8]

Platform ini didesain untuk memenuhi riset sistem komunikasi nirkabel dengan kinerja yang tinggi. Arsitektur *platform* ini terdiri dari empat komponen. Untuk lebih jelasnya bisa dilihat pada Gambar 2.14.

- a. *Custom Hardware* : Perangkat keras disesuaikan untuk memenuhi sistem komunikasi dengan kinerja yang tinggi. Perangkat keras ini menyediakan sumber daya untuk DSP berkecepatan tinggi yang bisa digunakann untuk implementasi algoritma yang intensif, terukur interkoneksi untuk mengalokasikan lebih banyak daya pemrosesan yang diperlukan, prosesor khusus, dan ekspansi *interface* yang lainnya.
- b. *Platform Support Packages* : Alat desain dan modul antarmuka tingkat rendah dirancang untuk memungkinkan penggunaan *hardware* oleh para peneliti di seluruh lapisan desain jaringan nirkabel.
- c. *Open-Access Repository* : Pusat penyimpanan untuk semua *source code*, model dan *file* desain *hardware*. *Content* secara lengkap akan tersedia di bawah lisensi BSD seperti *open-source*.
- d. *Research Applications* : Implementasi dari algoritma baru, diaktifkan oleh *hardware* khusus dan paket mendukung *platform*. Sistem Kendali menggabungkan algoritma baru dapat dengan cepat dibangun menggunakan bangunan standar modul blok yang disediakan dalam *repository*.



Gambar 2.14 Komponen-komponen Platform

2.6.2 Design Arsitektur WARPLab

Pada Gambar 2.15 menunjukkan jalur pemancar dan penerima dimana blok pemancar ditandai dengan warna merah muda dan blok penerima ditandai dengan warna biru.

Blok pada jalur pemancar :

- Tx I/Q Buffer: sampel *In-Phase* yang akan dikirim disimpan dalam Tx I Buffer dan sampel *Quadrature* yang akan dikirim disimpan dalam Tx Q Buffer.
- DAC I/Q: *Digital-to-Analog Converter* untuk sampel *In-Phase/Quadrature*.
- Tx BB Amplifier: *Transmitter Base Band Amplifier*. Ada dua amplifier, satu untuk sinyal *In-Phase* dan satu untuk sinyal *Quadrature*. Ini adalah *variabel Gain Amplifier* yang keduanya diatur dengan nilai penguatan yang sama, yang dapat dimasukkan oleh *user* dari *workspace* Matlab.
- Upconversion: Mengubah sinyal base band ke sinyal RF. Frekuensi *carrier* tergantung pada pengaturan PLL.
- Tx RF Amplifier: *Transmitter RF amplifier*, *Variabel Gain Amplifier*, nilai nilai penguatan yang dapat dimasukkan oleh *user* dari *workspace* Matlab.

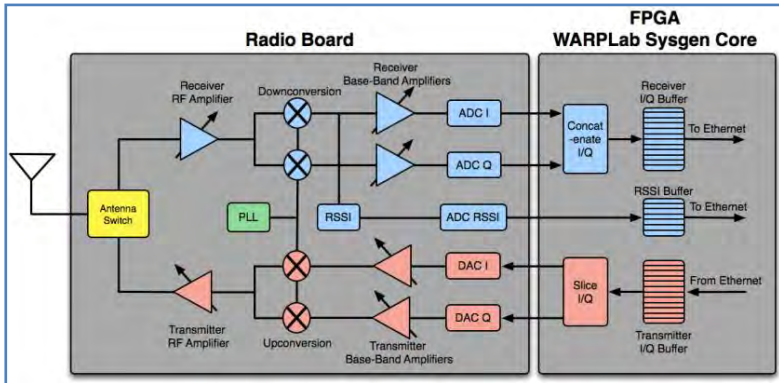
Blok pada jalur penerima:

- Rx RF Amplifier: *Receiver RF amplifier*, *variabel gain amplifier*, nilai penguatan yang dapat dimasukkan oleh *user* dari *workspace* Matlab.
- Downconversion: Mengubah sinyal RF ke basis sinyal *In-Phase/Quadrature* Band. Downconversion dari RF tergantung pada pengaturan PLL.

- c. Rx BB Amplifier: Receiver Basis Band Amplifier. Ada dua amplifier, satu untuk sinyal I dan satu untuk sinyal Q. Ini adalah *variabel Gain Amplifier* yang keduanya diatur dengan nilai penguatan yang sama, yang dapat dimasukkan oleh *user* dari *workspace* Matlab.
- d. Rx RF Amplifier: *Receiver RF amplifier*, *variabel gain amplifier*, nilai penguatan yang dapat dimasukkan oleh *user* dari *workspace* Matlab.
- e. Downconversion: Mengubah sinyal RF ke basis sinyal In-Phase/*Quadrature* Band. Downconversion dari RF tergantung pada pengaturan PLL.
- f. Rx BB Amplifier: Receiver Basis Band Amplifier. Ada dua amplifier, satu untuk sinyal I dan satu untuk sinyal Q. Ini adalah *variabel Gain Amplifier* yang keduanya diatur dengan nilai penguatan yang sama, yang dapat dimasukkan oleh *user* dari *workspace* Matlab.
- g. RSSI: *Received Signal Strength Indicator*. Blok ini mengukur RSSI tersebut.
- h. ADC I/Q: *Analog-to-Digital Converter* untuk sampel In-Phase/*Quadrature*.
- i. ADC RSSI: *Analog-to-Digital Converter* untuk pengukuran RSSI . Data RSSI tersedia di 1/4 laju data I/Q.
- j. Rx I/Q Buffer: sampel *In-Phase* yang diterima akan disimpan dalam Rx Buffer I dan sampel *Quadrature* yang diterima akan disimpan di Rx Q Buffer.
- k. RSSI Buffer: RSSI data disimpan dalam buffer ini.

Blok PLL : Pengaturan PLL menentukan frekuensi pembawa yang dapat diatur ke salah satu dari 14 kanal di Wi-Fi 2,4 GHz band atau 23 saluran di 5 GHz. Saluran pembawa dapat diatur langsung dari *workspace* Matlab.

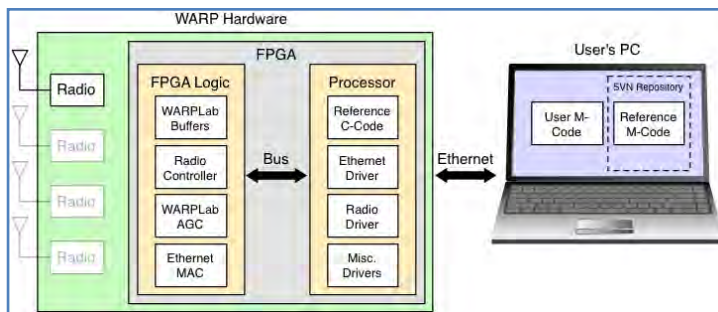
CATATAN: *Receiver RF dan BB gain* dapat diatur menggunakan *Gain Manual Control* (MGC) atau *Automatic Gain Control* (AGC). Dalam mode MGC pengguna mengambil nilai-nilai dari penguatan dan menetapkan penguatan pada modul menggunakan fungsi yang tersedia dalam Referensi WARPLab M-Code. Dalam mode AGC papan dikonfigurasi sehingga secara otomatis menetapkan penguatan penerima berdasarkan pengukuran RSSI . *Framework* WARPLab memberikan contoh yang menggambarkan bagaimana menggunakan mode MGC dan mode AGC.



Gambar 2.15 Design Arsitektur WARPLab

2.6.3 Gambaran Framework WARPLab[9]

WARPLab adalah *framework* yang bisa menggabungkan WARP dan Matlab. Dengan WARPLab, dapat berinteraksi dengan *node* WARP langsung dari *workspace* Matlab dan sinyal yang dihasilkan dalam MATLAB dapat ditransmisikan secara *real-time* melalui udara (*over-the-air*) menggunakan *node* WARP. Setup WARPLab ditunjukkan pada Gambar 2.16.



Gambar 2.16 Setup WARPLab

WARPLab sangat fleksibel, mendukung kombinasi dari perangkat keras WARP v1, v2, atau v3. Selain itu juga mendukung sejumlah radio pada setiap *board* WARP. Desain untuk PHY baru adalah sebagai berikut:

- a. Pengguna membuat dalam Matlab, sampel yang akan dikirim adalah bagian dari *custom* PHY.

- b. Sampel yang akan dikirim akan didownload ke *buffer* di *node* yang digunakan sebagai pemancar.
- c. Pengguna mengirimkan *trigger* untuk *node transmitter* dan *receiver*. Setelah penerimaan *trigger* ini, sampel dikirim *over-the-air* dan di-*capture* secara *real-time*.
- d. Pengguna membaca sampel yang ter-*capture* diambil dari *node* penerima dengan *workspace* Matlab.
- e. Sampel yang diterima diproses secara *offline* di Matlab

2.6.4 Spesifikasi WARPLab[8]

Tx/Rx I/Q Buffers

- a. Tx/Rx I/Q Buffers yang *independent*
- b. Setiap *buffer* dapat menyimpan maksimum 2^{14} sampel
- c. Frekuensi sampling yang digunakan adalah 40 MHz

Syarat Sinyal yang dipancarkan :

- a. Amplitudo pada bagian real (*In-Phase Signal : I*) adalah $[-1,1]$ dan amplitudo pada bagian imajiner (*Quadrature Signal : Q*) adalah $[-1,1]$. Sinyal I/Q pada pemancar terwakili dalam FPGA menggunakan 15-16 titik tetap.
- b. Frekuensi terendah : 30 KHz (*Radio Filter DC*)
- c. Frekuensi tertinggi : bergantung pada pengaturan frekuensi pada *Tx/Rx Low Pass Filter* (LPF). Secara default, Tx dan Rx LPF diatur oleh *nominal mode*. Adapun pengaturannya adalah sebagai berikut:

LPF pada pemancar

- 1) Mode 0 : Undefined
- 2) Mode 1 : 12 MHz (*Nominal Mode*)
- 3) Mode 2 : 18 MHz (*Turbo Mode 1*)
- 4) Mode 3 : 24 MHz (*Turbo Mode 2*)

LPF pada penerima

- 1) Mode 0 : 7.5 MHz
- 2) Mode 1 : 9.5 MHz (*Nominal Mode*)
- 3) Mode 2 : 14 MHz (*Turbo Mode 1*)
- 4) Mode 3 : 18 MHz (*Turbo Mode 2*)

I/Q ADC/DAC

- a. Clock selalu pada 40 MHz
- b. Masukan sinyal DAC I/Q direpresentasikan menggunakan titik tetap 16_15

- c. Masukan sinyal ADC I/Q direpresentasikan menggunakan titik tetap 14_13

Tx/Rx Amplifiers

- a. Tx RF PA : 30 dB
- b. Tx BB : 0-3 dB
- c. Tx RF : 0-63 dB
- d. Rx BB : 0-31 dB
- e. Rx RF : 0-63 dB

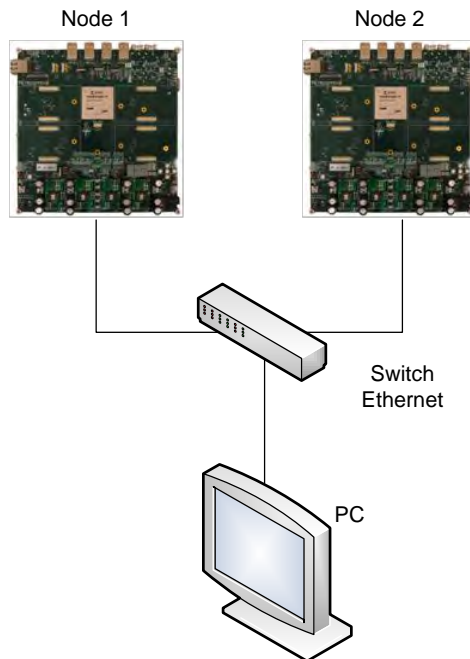
Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB III METODE PENELITIAN

Pada pengerjaan tugas akhir ini terdapat beberapa langkah yang dilakukan dalam pengerjaannya yaitu mengintegrasikan PC dengan WARP, memodelkan sistem komunikasi SISO dengan teknik modulasi M-QAM, dan menerapkan pemodelan menggunakan program MATLAB untuk pengolahan data sebelum dikirim dan setelah diterima secara. Langkah-langkah pengerjaan dapat dilihat pada Bab I, Gambar 1.1.

3.1 Integrasi PC dengan modul WARP

Pada penelitian ini menggunakan dua modul WARP versi 2 yaitu *node 1* dan *node 2*, proses integrasi WARP dengan PC menggunakan *switch ethernet* dan kabel LAN, seperti dapat dilihat pada Gambar 3.1

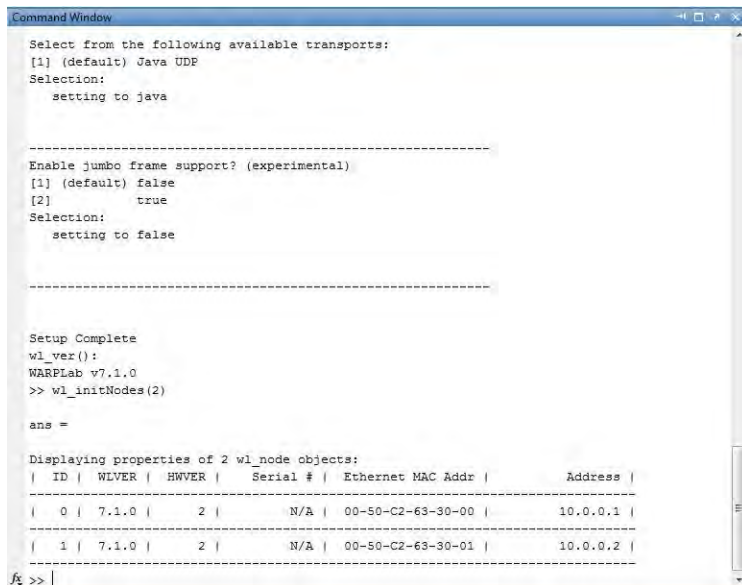


Gambar 3.1 Konfigurasi sistem komunikasi SISO dengan WARP

Pada pengerjaan tugas akhir ini digunakan WARPLab versi 7.1, WARP ini akan diintegrasikan dengan PC. WARPLab digunakan agar sinyal yang dibangkitkan melalui program Matlab bisa dikirimkan antar modul WARP secara *real time*. Langkah-langkah dalam proses integrasi PC dengan WARP versi 2 sebagai berikut :

1. Menghubungkan PC dengan WARP dengan menggunakan *switch ethernet* menggunakan kabel LAN seperti pada Gambar 3.1.
2. Mengatur IP pada PC dan warplab_defines pada program Matlab (IP yang digunakan harus sama antara PC dan Matlab).
3. Mengatur *routing ARP* pada *Command Prompt* dengan *run as administrator*.
4. Mengatur nomor IP pada WARP menjadi 10.0.0.1 untuk *node* 1 (pengirim) dan 10.0.0.2 untuk *node* 2 (penerima).

Pengaturan dilakukan dengan cara mengatur *dipswitch* seperti Gambar 3.2.



```

Command Window

Select from the following available transports:
[1] (default) Java UDF
Selection:
    setting to java

-----
Enable jumbo frame support? (experimental)
[1] (default) false
[2]         true
Selection:
    setting to false

-----

Setup Complete
wl_ver():
WARPLab v7.1.0
>> wl_initNodes(2)

ans =

Displaying properties of 2 wl_node objects:
| ID | WLVER | HWVER | Serial # | Ethernet MAC Addr | Address |
|----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 0 | 7.1.0 | 2 | N/A | 00-50-C2-63-30-00 | 10.0.0.1 |
| 1 | 7.1.0 | 2 | N/A | 00-50-C2-63-30-01 | 10.0.0.2 |

```

Gambar 3.2 Indikator keberhasilan Integrasi PC dengan WARP

3.2 Pemodelan Sistem Komunikasi SISO dengan Teknik Modulasi M-QAM

Pemodelan sistem komunikasi SISO meliputi pemodelan perangkat WARP seperti pada Gambar 3.1 dan pemodelan dilakukan pada program dengan menggunakan Matlab. Proses implementasi sistem komunikasi SISO dengan teknik modulasi M-QAM pada WARP menggunakan beberapa parameter yang telah diatur sebelumnya pada program Matlab. Parameter-parameter tersebut terdapat pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Parameter Sistem Komunikasi SISO dengan Teknik Modulasi M-QAM

No	Parameter	Nilai
1	<i>Filter</i>	Squared Root Raised Cosine
2	<i>Filter Order</i>	64
3	Roll Factor	0.9
4	Jumlah Preamble	13
5	Jumlah corr window	300
6	Jumlah delay	400
7	Frekuensi <i>Upconvert</i>	5 MHz
8	Frekuensi Sampling	40 MHz
9	Carrier channel	Disesuaikan
10	Transmitter <i>baseband</i> gain	1
11	Transmitter RF gain	0-31 dB
12	Receiver <i>baseband</i> gain	1
13	Receiver RF gain	1

Proses kerja sistem komunikasi SISO pada WARP dapat digambarkan pada blok diagram pada Gambar 3.3

Sistem Komunikasi SISO dengan modulasi M-QAM dimulai dengan membangkitkan data informasi berupa bit acak biner, misal deretan bit $u_i = [(1)(2)...u(n)]$ dengan n adalah banyak bit yang dibangkitkan. Kemudian, bit acak biner dibentuk menjadi deretan simbol simbol dengan menggunakan rumus pada persamaan (3.1)

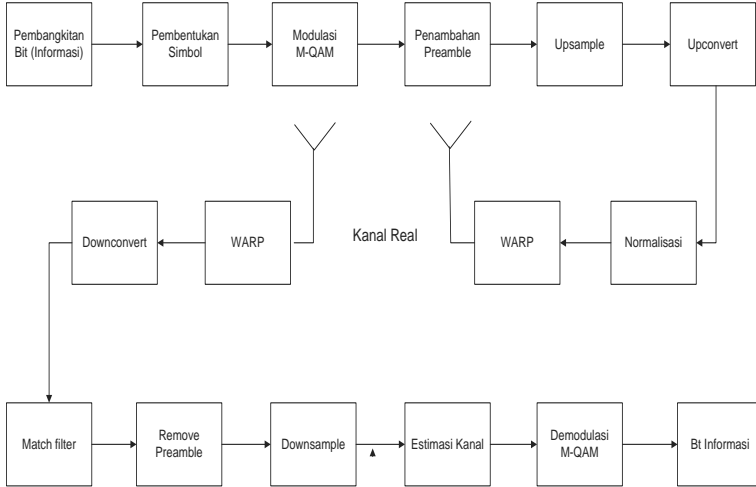
$$v = \sum_{i=1}^k u(i)2^{k-1} \quad (3.1)$$

dengan $k = \log_2 M$ dan M adalah level modulasi.

Simbol *integer* akan diolah sebagai *input* untuk proses modulasi. Simbol integer akan diubah menjadi bilangan kompleks yang sesuai dengan jenis teknik modulasi yang digunakan, seperti terlihat pada gambar konstelasi pada BAB II. Hasil proses modulasi berupa simbol

kompleks yang memiliki nilai real dan imajiner. Deretan simbol hasil modulasi seperti persamaan (3.2)

$$\mathbf{v}_m = [v_1 v_2 v_3 \dots v_{(n/k)}] \quad (3.2)$$



Gambar 3.3 Blok Diagram Sistem Komunikasi SISO dengan Teknik Modulasi M-QAM

Kemudian, ditambahkan simbol pilot yang digunakan untuk respon estimasi kanal. Deretan simbol tersebut kemudian ditambahkan deretan *preamble* untuk menentukan letak simbol informasi pertama yang diterima di penerima.

Proses selanjutnya adalah *upsample*. *Upsample* bertujuan untuk meningkatkan *sampling rate* dari data yang dikirim. Proses ini dilakukan dengan melewati ke *filter Squared Root Raised Cosine* (SRRC). Respon dari *filter raised cosine* adalah:

$$RC(t) = \text{sinc}\left(\frac{1}{T}\right) \frac{\cos \frac{\alpha \pi t}{T}}{1 - \left(\frac{2\alpha t}{T}\right)^2} \quad (3.3)$$

dengan nilai α adalah nilai *roll-off factor*, α memiliki nilai sebesar $0 \leq \alpha < 1$.

Proses berikutnya adalah *upconvert* yaitu melakukan konversi sinyal ke frekuensi yang lebih tinggi dengan menggeser frekuensi tengah sinyal *baseband* ke frekuensi yang lebih tinggi. Pada pengerjaan tugas akhir ini frekuensi yang digunakan sebesar 5 MHz. Proses *upconvert* dilakukan untuk menghindari pelemahan dari radio DC. Proses

upconvert dilakukan dengan mengalikan sinyal terhadap frekuensi sinusoida kompleks, yaitu

$$\exp(j\sqrt{-1} \times 2\pi f_c t) \quad (3.4)$$

dengan f_c adalah frekuensi *sampling*, t adalah waktu.

Sebelum proses pengiriman melalui WARP, sinyal yang akan dikirim dinormalisasi untuk mengoptimalkan DAC yang terdapat pada perangkat WARP. Pengoptimalan DAC pada nilai dengan range -1 sampai +1. Proses normalisasi dengan cara menentukan nilai skala, kemudian nilai skala tersebut dikalikan dengan sinyal hasil *upconvert*.

$$skala = \frac{1}{\max \text{ real dan imajiner sinyal hasil upconvert}} \quad (3.5)$$

Langkah berikutnya sinyal tersebut dikirimkan ke *buffer transmitter* melalui *switch ethernet*. Proses pengiriman akan berlangsung setelah dikirimkan paket sinkronisasi dari pengirim (*transmitter*) ke penerima (*receiver*). Proses yang ada di penerima merupakan kebalikan dari yang ada di pengirim, dimulai dengan proses *downconvert*. Pada proses ini, dilakukan pengalihan sinyal dengan konjugat dari frekuensi *upconvert* yaitu

$$\exp(-j\sqrt{-1} \times 2\pi f_c t) \quad (3.6)$$

dengan f_c adalah frekuensi *sampling* dan t adalah waktu.

Proses selanjutnya adalah *matched filtering*, frekuensi tinggi yang dihasilkan dari proses *downconvert* akan dihilangkan dengan *matched filtering* agar sesuai dengan bentuk pulsa *raised cosine* di sisi pengirim. Setelah proses *matched filtering*, dilakukan proses pendeteksian simbol pertama menggunakan *preamble*. Proses deteksi simbol pertama dilakukan berdasarkan korelasi tertinggi antara *sample* sinyal yang diterima dengan *sample preamble*. Proses *downsample* dilakukan setelah didapat posisi *preamble* berdasarkan nilai korelasi tertinggi. Sinyal di-*downsample* dengan jumlah *sample* saat *upsample*. Proses selanjutnya adalah deteksi simbol, proses deteksi simbol dilakukan dengan estimasi kanal yang dilakukan dengan metode pilot. Skema estimasi kanal yaitu di sisi pengirim, deretan simbol informasi disisipkan sebuah simbol pilot (*estimator*) yang diletakkan secara periodik.

Pada sisi penerima, nilai simbol yang diterima dikalikan dengan nilai skala yang sama di sisi pengirim. Nilai simbol diketahui sebagai hasil kali dengan *estimator* karena asumsi tipe kanal yang *flat fading*. Proses perbaikan fase dan amplitudo dapat dilakukan dengan perkalian simbol dengan konjugat estimasi kanal kemudian dibagi dengan kuadrat nilai mutlak dari estimasi kanal. Deretan simbol selanjutnya

didemodulasi untuk mendapatkan nilai simbol dalam integer. Simbol yang dihasilkan dari proses demodulasi diubah menjadi deretan bit dengan menggunakan cara merubah simbol integer ke bit. Setelah itu BER dapat dihitung dengan membandingkan deretan bit yang di kirim dengan deretan bit yang di terima.

3.3 Metode Pengukuran

Pengukuran dilakukan di dua kondisi lingkungan yang berbeda yaitu di dalam ruangan (*indoor*) yang dilakukan di ruang B304 Laboratorium Telekomunikasi Multimedia Jurusan Teknik Elektro dengan kondisi LOS dan NLOS. Dan di luar ruangan (*outdoor*) di tempat parkir dosen Jurusan Teknik Elektro dengan kondisi LOS dan NLOS. Tujuan pengukuran dilakukan di lingkungan yang berbeda agar didapat hasil dengan kondisi lingkungan yang berbeda, dengan banyak benda yang mempengaruhi maka *multipath fading* akan berbeda juga.

3.3.1 Pengukuran Lingkungan *Indoor*

Pengukuran lingkungan *indoor* dilakukan di ruang B304 Laboratorium Telekomunikasi Multimedia Jurusan Teknik Elektro. Jarak antara *node* pengirim dan penerima disesuaikan. Pengukuran pada lingkungan *indoor* untuk kondisi LOS dan NLOS ditunjukkan pada Gambar 3.4 dan Gambar 3.5.

3.3.2 Pengukuran Lingkungan *Outdoor*

Pengukuran lingkungan *outdoor* dilakukan di tempat parkir dosen Jurusan Teknik Elektro. Jarak antara *node* pengirim dan penerima adalah 6 meter. Pengukuran pada lingkungan *outdoor* ditunjukkan pada Gambar 3.6 dan Gambar 3.7.

3.3.3 Metode Perhitungan *Bit Error Rate (BER)*

Saat *output* diperoleh, kinerja sistem dapat diukur menggunakan parameter BER. BER merupakan perbandingan antara total bit yang salah dengan total bit yang dikirim. BER dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$BER = \frac{\text{Jumlah bit yang salah}}{\text{Jumlah bit yang dikirim}} \quad (3.7)$$



Gambar 3.4 Pengukuran pada Lingkungan *Indoor* untuk kondisi LOS



Gambar 3.5 Pengukuran pada Lingkungan *Indoor* untuk kondisi NLOS



Gambar 3.6 Pengukuran pada Lingkungan *Outdoor* untuk kondisi LOS



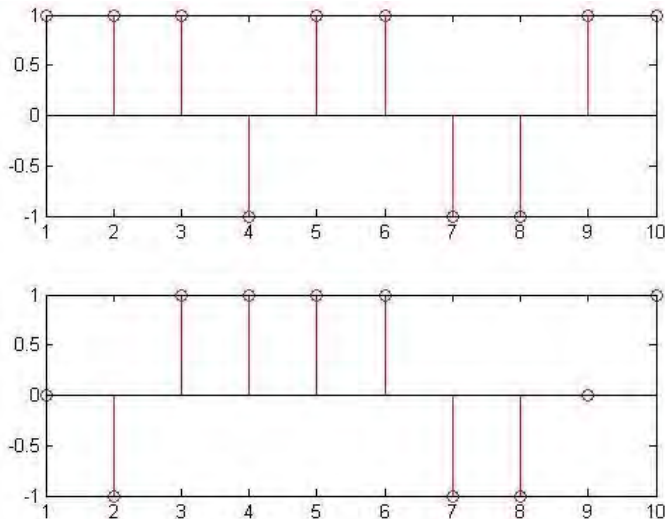
Gambar 3.7 Pengukuran pada Lingkungan *Outdoor* untuk kondisi NLOS

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

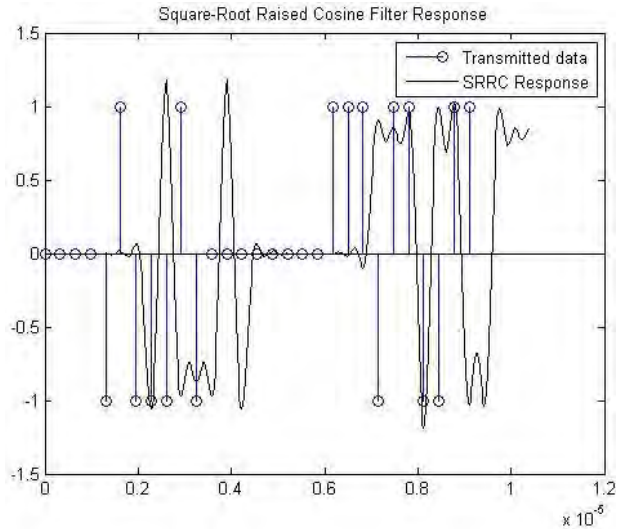
Pada bab ini akan dilakukan analisa kinerja sistem komunikasi SISO dengan teknik modulasi M-QAM dengan membandingkan *Bit Error Rate* (BER) pada lingkungan *indoor* dan *outdoor*.

4.1 Proses Sistem Komunikasi SISO dengan Teknik Modulasi M-QAM

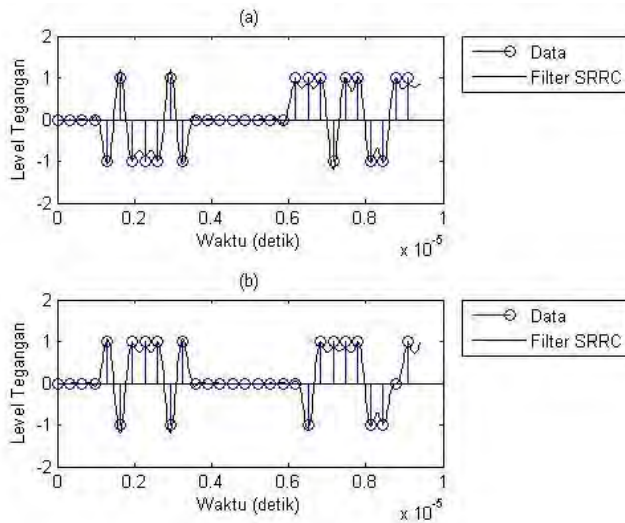
Informasi yang akan dikirimkan pada implementasi sistem komunikasi SISO dengan teknik modulasi M-QAM melalui beberapa tahap, seperti yang telah digambarkan pada diagram blok pada Gambar 3.3. Pertama, membangkitkan data informasi berupa bit acak biner. Kemudian, data tersebut membentuk simbol lalu dilakukan proses modulasi. Selanjutnya, hasil modulasi ditambahkan simbol pilot dan *preamble*. Hasil pembangkitan bit, pemetaan simbol dan proses modulasi serta penambahan simbol pilot dan *preamble* ditunjukkan pada Gambar 4.1 dan Gambar 4.2 secara berurutan. .



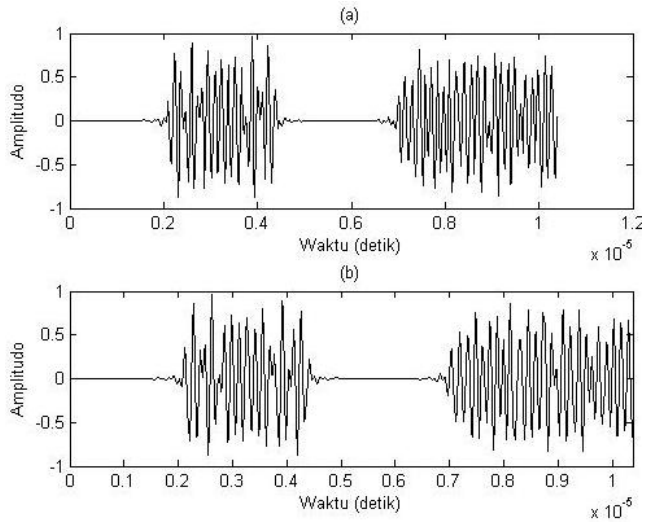
Gambar 4.1 Data yang dikirim dalam bentuk bit



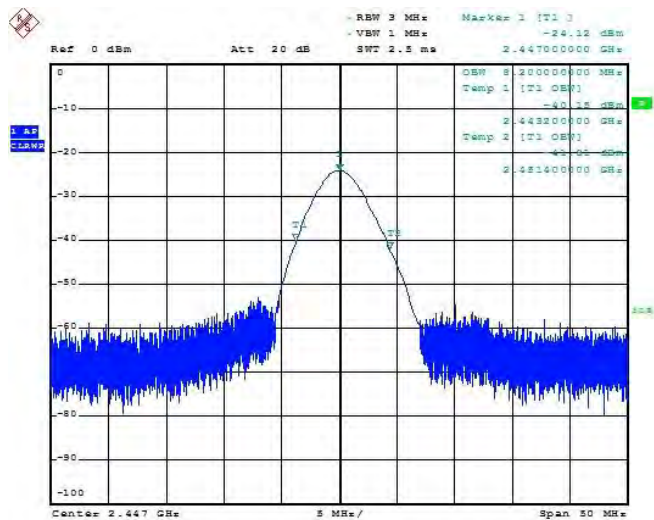
Gambar 4.3 Data yang dikirim dalam bentuk simbol melewati filter raised cosine



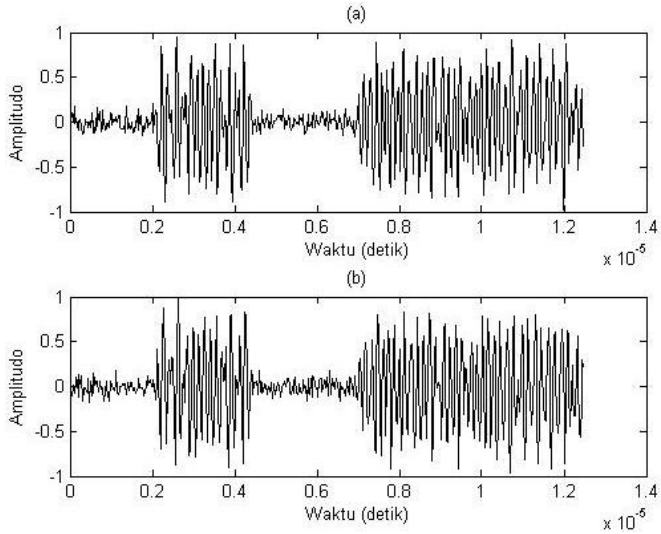
Gambar 4.4 Hasil *filter* SRRC pada simbol (a) inphase dan (b) *quadrature*



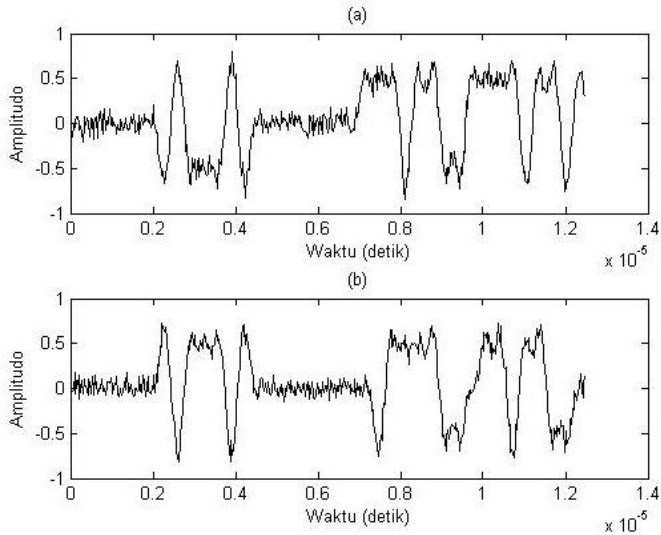
Gambar 4.5 Hasil *upconvert* (a) inphase dan (b) *quadrature baseband*



Gambar 4.6 Spektrum sinyal sebelum ditransmisikan



Gambar 4.7 Sinyal (a) inphase dan (b) *quadrature* pada penerima

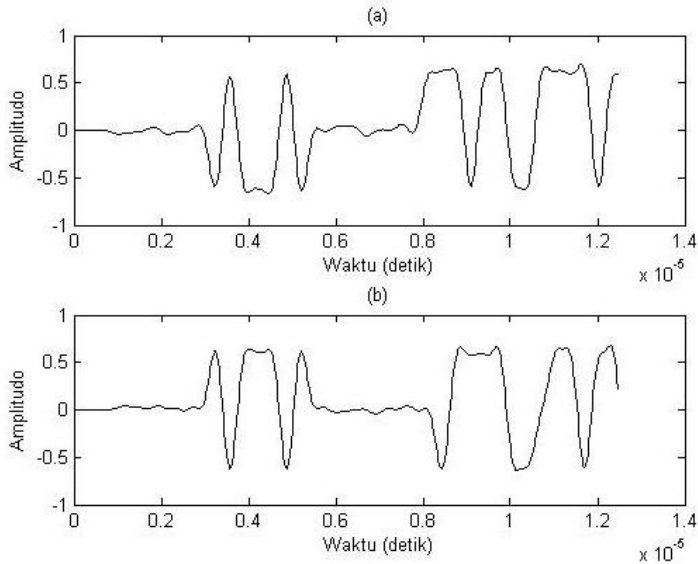


Gambar 4.8 Sinyal (a) in-phase dan (b) *quadrature* setelah proses *downconvert* pada penerima

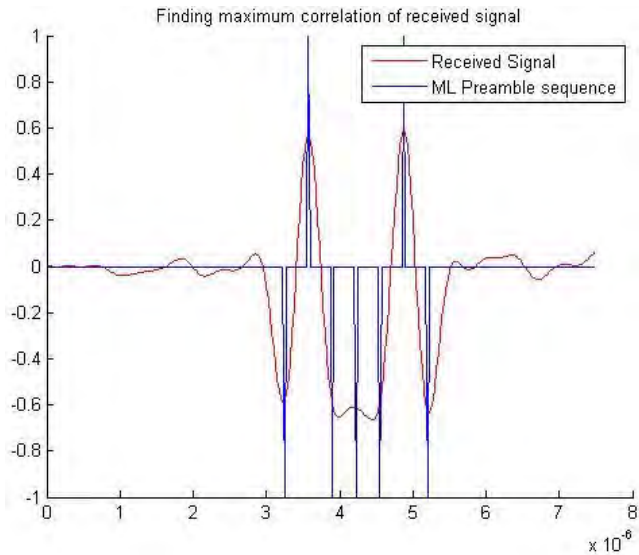
Selanjutnya dilakukan proses *matched filtering*, proses *matched filtering* akan menghilangkan elemen frekuensi tinggi sebelum melakukan proses deteksi *preamble* dan simbol. Bentuk sinyal serta spektrumnya setelah proses *matched filtering* dapat dilihat pada Gambar 4.9. Pada pengamatan sinyal pada gambar 4.9, terjadi pergeseran sinyal. Hal ini disebabkan oleh *delay* yang terdapat pada proses *filtering*.

Kemudian dilakukan proses pendeteksian simbol pertama menggunakan *preamble*. Pendeteksian simbol pertama dilakukan berdasarkan korelasi tertinggi terhadap *preamble*. Hasil proses pendeteksian *preamble* dapat dilihat pada Gambar 4.10.

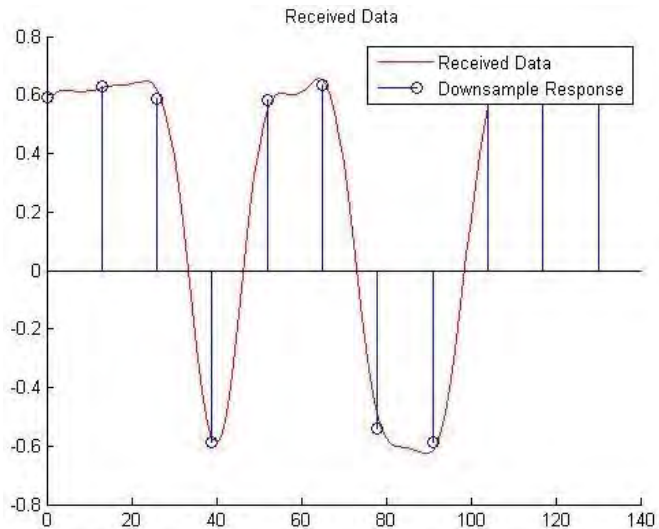
Selanjutnya proses *downsample* dilakukan setelah didapat posisi *preamble* berdasarkan nilai korelasi tertinggi. Sinyal *downsample* dengan jumlah *sample* saat *upsample*. Hasil *downsample* ditunjukkan pada Gambar 4.11



Gambar 4.9 Sinyal (a) inphase dan (b) *quadrature* setelah *matched filtering*



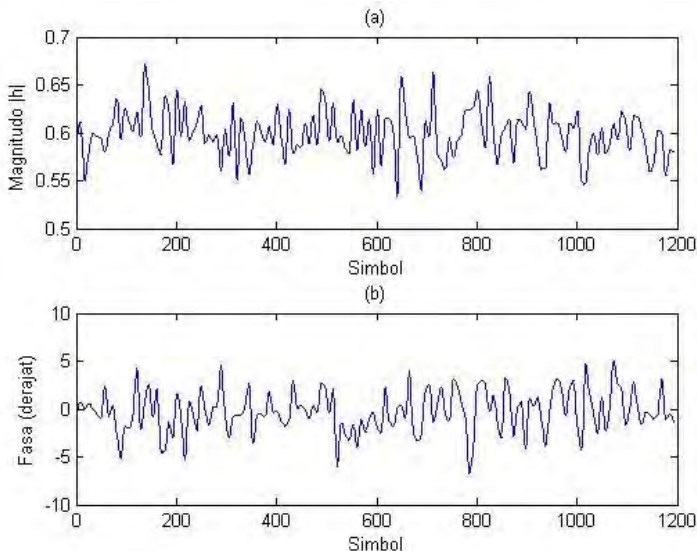
Gambar 4.10 Nilai korelasi tertinggi sinyal yang diterima



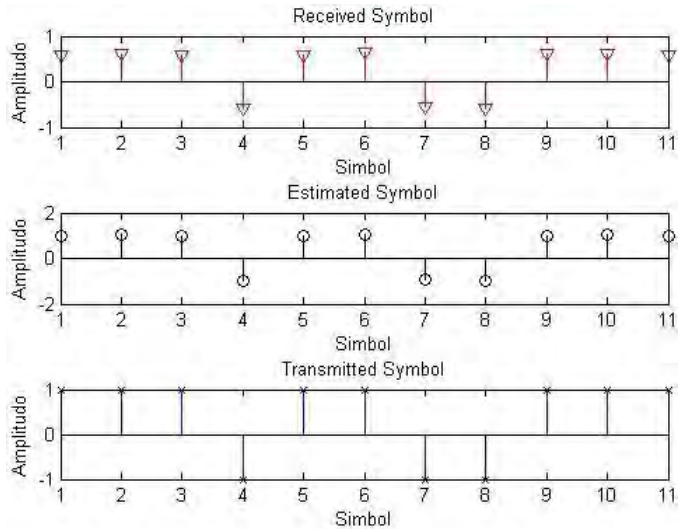
Gambar 4.11 Sample sinyal pertama yang diterima dan setelah downsample

Setelah proses *downsample* selanjutnya proses estimasi kanal dilakukan berdasarkan estimator yang diletakan secara periodik pada awal proses transmisi simbol. Estimasi respon magnitudo dan fasa kanal dapat terlihat pada gambar 4.12. Pada gambar 4.12 dapat dilihat bahwa terdapat variasi pada fasa kanal dan magnitudo sinyal. Pada estimasi fasa kanal, dapat diasumsikan bahwa fasa merupakan fungsi linear. Sedangkan pada magnitudo sinyal, terdapat variasi amplitudo untuk masing-masing simbol yang diterima.

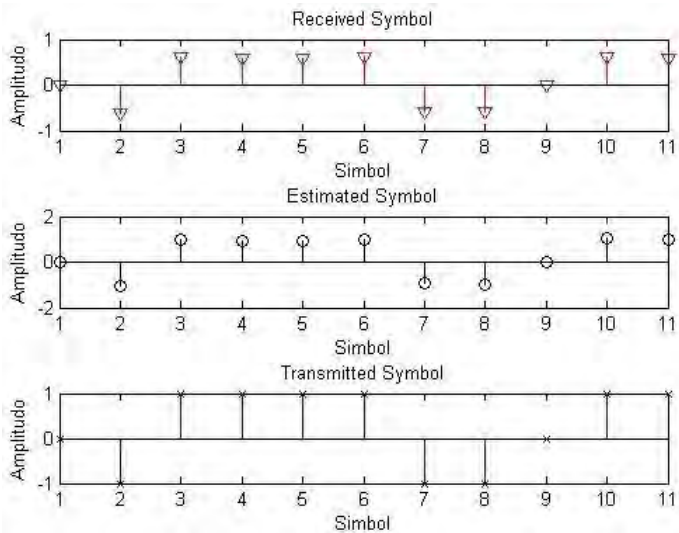
Pada Gambar 4.13 dan Gambar 4.14 dapat dilihat perbandingan antara simbol yang diterima, simbol hasil estimasi dengan simbol yang dikirim. Pada gambar hasil perbandingan simbol dapat diamati bahwa simbol-simbol yang diterima mengalami pergeseran fasa. Pada proses deteksi simbol, tanpa melakukan perbaikan fasa bisa dilihat simbol akan mengalami kesalahan deteksi. Perbandingan ini penting untuk mengetahui bahwa simbol yang dikirimkan benar dengan metode *phase recovery* yang tepat.



Gambar 4.12 Estimasi (a) magnitudo kanal dan (b) fasa kanal SISO dengan teknik modulasi M-QAM

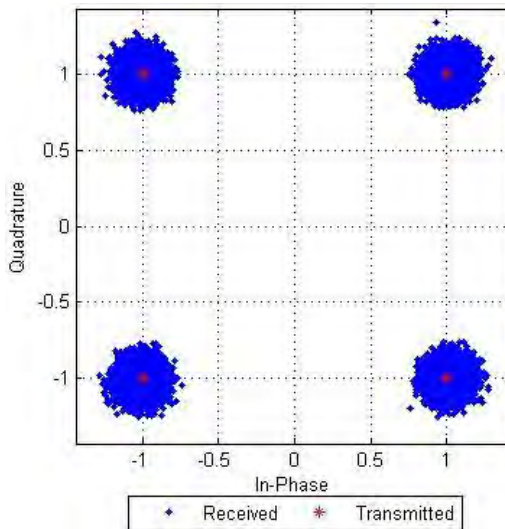


Gambar 4.13 Perbandingan Simbol In-Phase

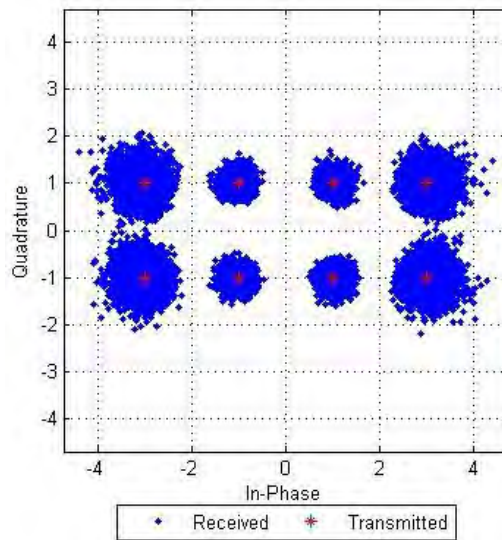


Gambar 4. 14 Perbandingan Simbol *Quadrature*

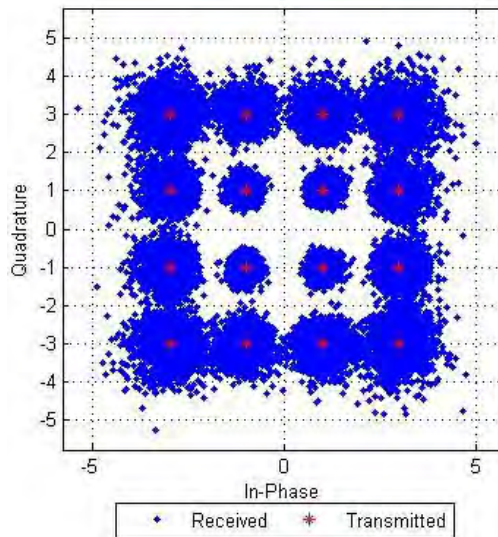
Selanjutnya analisa simbol yang diterima dilakukan dengan menggunakan *scatterplot* untuk menentukan wilayah deteksi simbol pada sistem komunikasi M-QAM. Simbol yang diamati telah melewati proses estimasi kanal dan perbaikan fasa. Konstelasi simbol untuk 4-QAM, 8-QAM, 16-QAM, 32-QAM, dan 64-QAM dapat dilihat secara berurutan pada Gambar 4.15, Gambar 4.16, Gambar 4.17, Gambar 4.18, Gambar 4.19. Pada konstelasi simbol yang diterima, simbol yang dideteksi untuk 4-QAM, 8-QAM dan 16-QAM mendekati simbol yang diterima. Sedangkan untuk 32-QAM dan 64-QAM terlihat simbol yang diterima lebih rapat karena jarak titik konstelasi yang semakin kecil, yang mengakibatkan terjadinya *bit error* yang lebih besar. Untuk konstelasi 8-QAM, 16-QAM dan 32-QAM, simbol yang diterima di titik terluar konstelasi mengalami penyebaran simbol yang paling besar pada penerima. Ini disebabkan karena perbedaan amplitudo, titik konstelasi yang berada pada titik paling luar mempunyai amplitudo yang lebih besar jika dibandingkan dengan titik konstelasi bagian dalam. Hal ini dikarenakan amplitudo yang besar membutuhkan daya yang besar, sedangkan E_b/N_0 yang dikirimkan untuk semua titik konstelasi bernilai sama. Karena untuk titik konstelasi bagian luar membutuhkan daya yang besar maka konstelasi yang diterima terjadi penyebaran yang lebih besar jika dibandingkan dengan titik konstelasi bagian dalam.



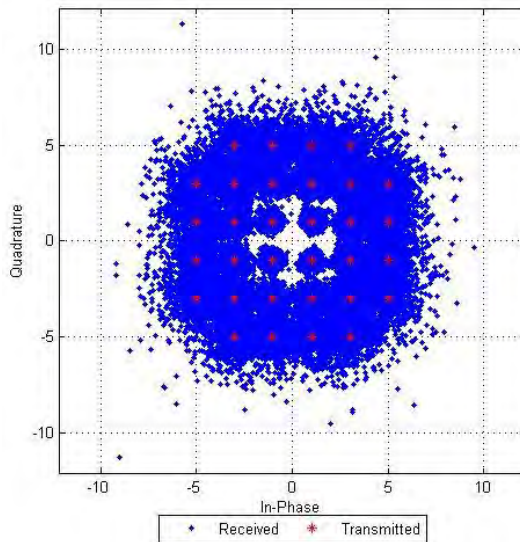
Gambar 4.15 Konstelasi simbol 4-QAM pada penerima



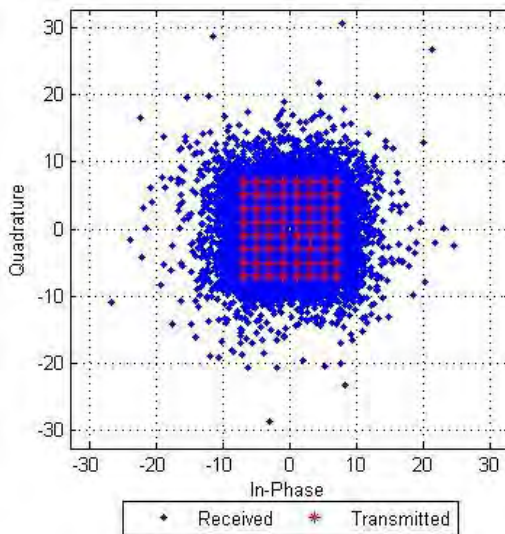
Gambar 4.16 Konstelasi simbol 8-QAM pada penerima



Gambar 4.17 Konstelasi simbol 16-QAM pada penerima



Gambar 4.18 Konstelasi simbol 32-QAM pada penerima



Gambar 4.19 Konstelasi simbol 64-QAM pada penerima

4.2 Analisa Hasil Pengukuran dengan Teknik Modulasi M-QAM (*Indoor*)

Pengukuran *indoor* dengan teknik modulasi M-QAM dilakukan dengan mengubah jarak antar *node* pengirim dan penerima dengan jarak 4 meter, 5 meter dan 6 meter. Jumlah bit yang dikirim adalah 120000 bit. Nilai Tx_BB = 1, Tx_Rf = 60 dengan step 4, Rx_BB = 1, dan Rx_Rf = 1.

4.2.1 Kondisi *Line of Sight* (LOS)

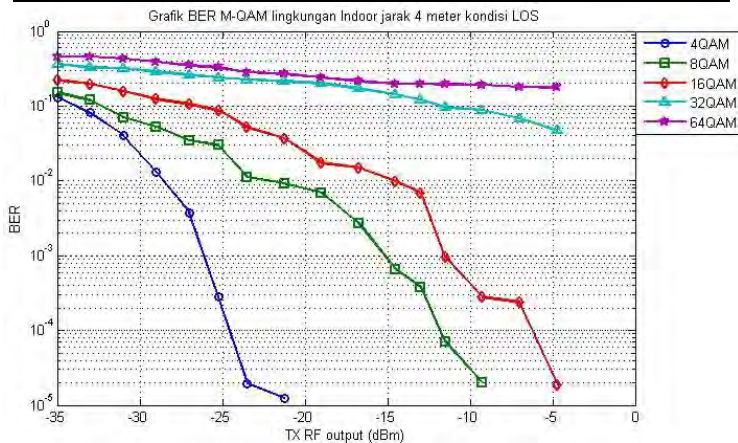
Berdasarkan data hasil pengukuran pada Tabel 4.1, Tabel 4.2 dan Tabel 4.3 maka diperoleh grafik BER untuk jarak 4 meter, 5 meter dan 6 meter pada kondisi *line of sight* (LOS) di lingkungan *indoor* yang ditunjukkan secara berutan pada Gambar 4.20, Gambar 4.21 dan Gambar 4.22.

Tabel 4. 1 Data Hasil pengukuran *Indoor* untuk kondisi LOS dengan jarak 4 meter

Gain	4 QAM	8 QAM	16 QAM	32 QAM	64 QAM
1 = 0	0,1299917	0,149889	0,223583	0,366958	0,460669
2 = 4	0,0808708	0,120658	0,197728	0,324249	0,459419
3 = 8	0,0404	0,070658	0,157175	0,321949	0,426892
4 = 12	0,0128917	0,052325	0,124444	0,287067	0,388206
5 = 16	0,0037667	0,034694	0,106175	0,262066	0,350083
6 = 20	0,0002792	0,030111	0,087469	0,240581	0,325833
7 = 24	0,0000195	0,011244	0,052011	0,224911	0,281417
8 = 28	0,0000125	0,00928	0,03695	0,214408	0,267022
9 = 32	0,00000	0,006918	0,017325	0,200623	0,239922
10 = 36	0,00000	0,002704	0,015002	0,171478	0,215025
11 = 40	0,00000	0,000656	0,009786	0,143076	0,199106
12 = 44	0,00000	0,000378	0,006944	0,122077	0,197256
13 = 48	0,00000	7,07E-05	0,000944	0,095389	0,195236
14 = 52	0,00000	1,98E-05	0,000278	0,087994	0,192442
16 = 56	0,00000	0,00000	0,000237	0,068025	0,180733
17 = 60	0,00000	0,00000	1,88E-05	0,047433	0,177944

Tabel 4. 2 Data Hasil pengukuran *Indoor* untuk kondisi LOS dengan jarak 5 meter

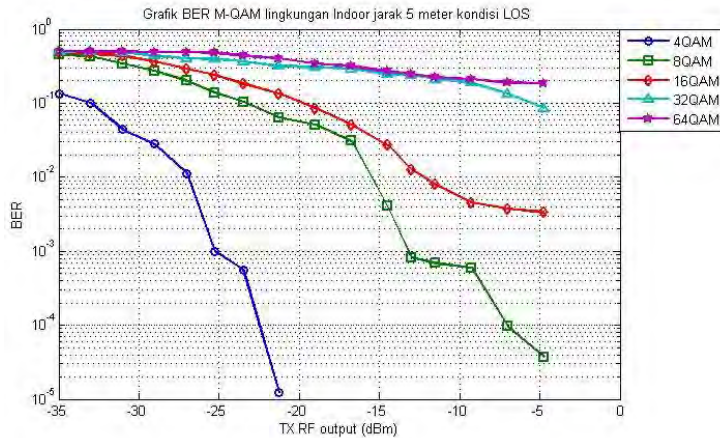
Gain	4 QAM	8 QAM	16 QAM	32 QAM	64 QAM
1 = 0	0,13400	0,45108	0,48933	0,49775	0,50002
2 = 4	0,09968	0,42804	0,46579	0,49351	0,49883
3 = 8	0,04433	0,34092	0,43713	0,48943	0,49775
4 = 12	0,02808	0,27460	0,36438	0,43327	0,49142
5 = 16	0,01126	0,20159	0,29339	0,40387	0,48943
6 = 20	0,00099	0,13944	0,23945	0,39871	0,47913
7 = 24	0,00055	0,10328	0,18265	0,36223	0,43327
8 = 28	0,00001	0,06437	0,13540	0,31487	0,40387
9 = 32	0,00000	0,05097	0,08551	0,30655	0,34159
10 = 36	0,00000	0,03094	0,05123	0,29339	0,31487
11 = 40	0,00000	0,00405	0,02721	0,24470	0,27023
12 = 44	0,00000	0,00082	0,01265	0,23945	0,24595
13 = 48	0,00000	0,00069	0,00794	0,21179	0,22127
14 = 52	0,00000	0,00060	0,00453	0,18760	0,21179
16 = 56	0,00000	0,00010	0,00376	0,13540	0,18760
17 = 60	0,00000	0,00004	0,00336	0,08551	0,18595



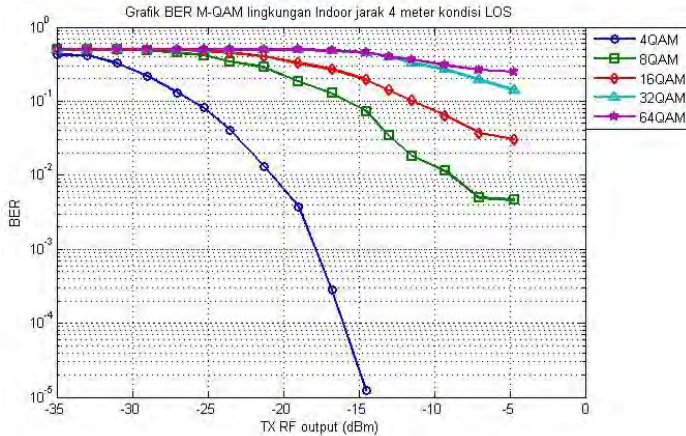
Gambar 4. 20 Grafik BER Indoor jarak 4 meter kondisi LOS

Tabel 4. 3 Data Hasil pengukuran *Indoor* untuk kondisi LOS dengan jarak 6 meter

Gain	4 QAM	8 QAM	16 QAM	32 QAM	64 QAM
1 = 0	0,42545	0,49795	0,50008	0,50138	0,50187
2 = 4	0,41761	0,49694	0,49903	0,50021	0,50138
3 = 8	0,32820	0,49578	0,49851	0,50005	0,50021
4 = 12	0,21628	0,49060	0,49426	0,50002	0,50005
5 = 16	0,12999	0,45032	0,49295	0,50008	0,50002
6 = 20	0,08087	0,41709	0,48154	0,49903	0,49931
7 = 24	0,04040	0,34435	0,44828	0,49851	0,49799
8 = 28	0,01289	0,28726	0,40143	0,49426	0,49497
9 = 32	0,00377	0,18607	0,32544	0,49295	0,49455
10 = 36	0,00028	0,12703	0,26893	0,48154	0,48140
11 = 40	0,00001	0,07281	0,19346	0,44828	0,45624
12 = 44	0,00000	0,03385	0,14018	0,40143	0,39768
13 = 48	0,00000	0,01818	0,10219	0,32544	0,36531
14 = 52	0,00000	0,01140	0,06348	0,26893	0,30523
16 = 56	0,00000	0,00492	0,03674	0,19346	0,26484
17 = 60	0,00000	0,00460	0,03040	0,14018	0,24623



Gambar 4. 21 Grafik BER Indoor jarak 5 meter kondisi LOS



Gambar 4. 22 Grafik BER Indoor jarak 6 meter kondisi LOS

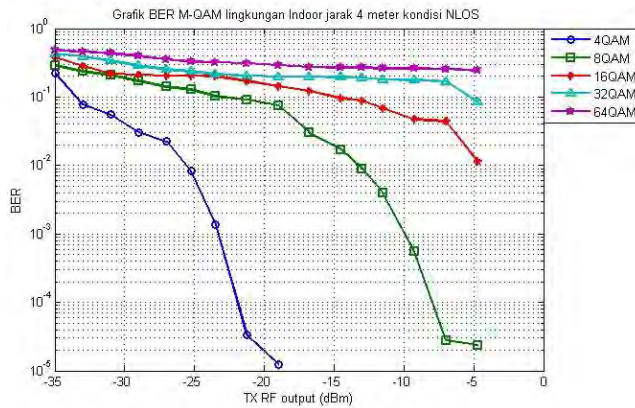
Berdasarkan Gambar 4.20, Gambar 4.21 dan Gambar 4.22 untuk teknik modulasi QAM pada jarak 4 meter kondisi LOS, nilai BER 4-QAM mencapai 0 pada saat daya yang dipancarkan sebesar -21,2 dBm, sedangkan untuk jarak 5 meter nilai BER mencapai 0 pada saat daya yang dipancarkan sebesar -21 dBm, dan untuk jarak 6 meter nilai BER mencapai 0 saat daya pancar -14,5 dBm. Hal ini menandakan bahwa jarak dan daya pancar mempengaruhi kualitas kerja sistem komunikasi ini. Dimana nilai BER semakin besar terhadap bertambahnya jarak antar *node* untuk daya pancar yang tetap tetap. Dan sebaliknya nilai BER semakin kecil terhadap bertambahnya daya yang dipancarkan untuk jarak antar *node* tetap. Ini juga berlaku untuk level modulasi (M) yang lebih tinggi seperti 8-QAM, 16-QAM, 32-QAM dan 64-QAM. Hanya saja jika level modulasi semakin tinggi maka jumlah *bit error* yang terjadi semakin banyak. Ini dapat dilihat dari Gambar 4.15, Gambar 4.16, Gambar 4.17, Gambar 4.18 dan Gambar 4.19 secara berurutan untuk perbandingan konstelasi simbol di penerima, ini menandakan bahwa level modulasi juga berpengaruh terhadap kinerja sistem.

4.2.2 Kondisi Non Line of Sight (NLOS)

Berdasarkan data hasil pengukuran pada Tabel 4.4, Tabel 4.5 dan Tabel 4.6 maka diperoleh grafik BER untuk jarak 4 meter, 5 meter dan 6 meter pada kondisi *non line of sight* (NLOS) di lingkungan *indoor* yang ditunjukkan secara berutan pada Gambar 4.23, Gambar 4.24 dan Gambar 4.25.

Tabel 4. 4 Data Hasil pengukuran *Indoor* untuk kondisi NLOS dengan jarak 4 meter

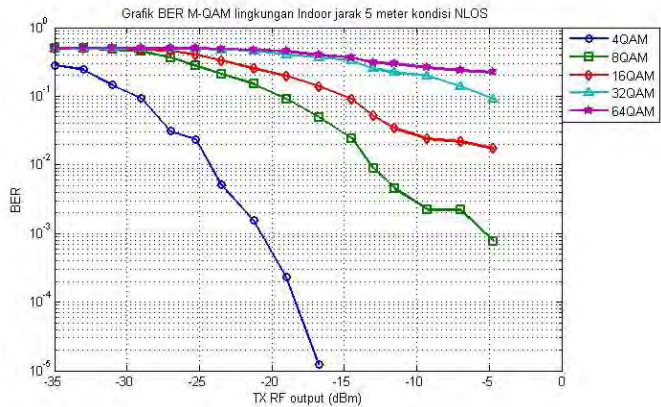
Gain	4 QAM	8 QAM	16 QAM	32 QAM	64 QAM
1 = 0	0,223583	0,288375	0,379581	0,426892	0,479018
2 = 4	0,077728	0,235548	0,282489	0,388206	0,457485
3 = 8	0,054989	0,207858	0,219494	0,337008	0,436253
4 = 12	0,030658	0,170054	0,210581	0,285258	0,398555
5 = 16	0,022325	0,140917	0,204911	0,251417	0,35382
6 = 20	0,008229	0,128775	0,204408	0,237022	0,325908
7 = 24	0,001358	0,101618	0,200623	0,216022	0,318933
8 = 28	3,33E-05	0,091244	0,171478	0,205025	0,312022
9 = 32	1,25E-05	0,074694	0,143076	0,199106	0,289948
10 = 36	0,00000	0,030111	0,122077	0,197256	0,273622
11 = 40	0,00000	0,01698	0,095389	0,195236	0,270237
12 = 44	0,00000	0,008979	0,087994	0,192442	0,267348
13 = 48	0,00000	0,003944	0,068025	0,180733	0,262142
14 = 52	0,00000	0,000556	0,047433	0,177944	0,261693
16 = 56	0,00000	2,78E-05	0,044278	0,1671	0,257125
17 = 60	0,00000	2,37E-05	0,011389	0,084444	0,243525



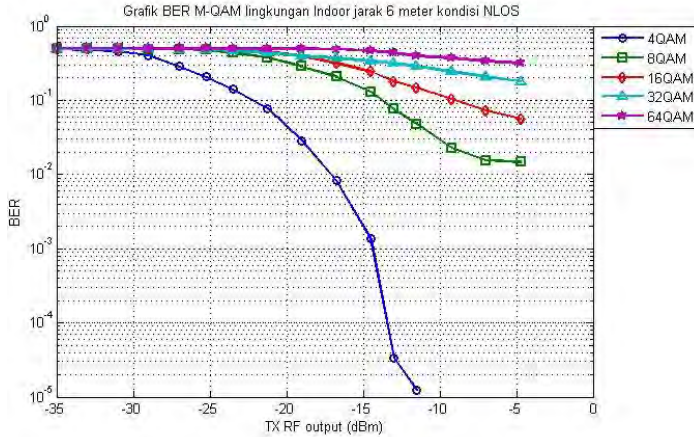
Gambar 4.23 Grafik BER Indoor jarak 4 meter kondisi NLOS

Tabel 4. 5 Data Hasil pengukuran *Indoor* untuk kondisi NLOS dengan jarak 5 meter

Gain	4 QAM	8 QAM	16 QAM	32 QAM	64 QAM
1 = 0	0,28047	0,49389	0,49678	0,50056	0,50080
2 = 4	0,24290	0,49382	0,49608	0,49939	0,50068
3 = 8	0,14566	0,47939	0,49495	0,49937	0,50056
4 = 12	0,09332	0,44768	0,47558	0,49608	0,49939
5 = 16	0,03073	0,36471	0,45394	0,49559	0,49937
6 = 20	0,02335	0,27790	0,40199	0,49495	0,49559
7 = 24	0,00515	0,21070	0,33049	0,47232	0,49001
8 = 28	0,00155	0,15075	0,25088	0,45394	0,47232
9 = 32	0,00023	0,09081	0,19623	0,40199	0,45010
10 = 36	0,00001	0,04982	0,13859	0,36471	0,39871
11 = 40	0,00000	0,02416	0,09058	0,33049	0,36223
12 = 44	0,00000	0,00892	0,05157	0,25088	0,30655
13 = 48	0,00000	0,00449	0,03398	0,22316	0,29403
14 = 52	0,00000	0,00221	0,02379	0,19623	0,26090
16 = 56	0,00000	0,00220	0,02187	0,13859	0,23678
17 = 60	0,00000	0,00077	0,01731	0,09058	0,22316



Gambar 4.24 Grafik BER Indoor jarak 5 meter kondisi NLOS



Gambar 4.25 Grafik BER Indoor jarak 6 meter kondisi NLOS

4.3 Analisa Hasil Pengukuran dengan Teknik Modulasi M-QAM (*Outdoor*)

Pengukuran *outdoor* dengan teknik modulasi M-QAM dilakukan dengan mengubah jarak antar *node* pengirim dan penerima dengan jarak 5 meter dan 6 meter. Jumlah bit yang dikirim adalah 120000 bit. Nilai $T_x_BB = 1$, $T_x_Rf = 60$ dengan step 3, $R_x_BB = 1$, dan $R_x_Rf = 1$.

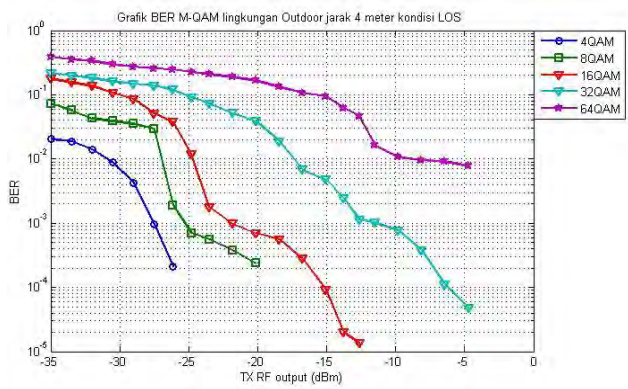
4.3.1 Kondisi *Line of Sight* (LOS)

Berdasarkan data hasil pengukuran pada Tabel 4.7, Tabel 4.8 dan Tabel 4.9 maka diperoleh grafik BER untuk jarak 4 meter, 5 meter dan 6 meter pada kondisi *line of sight* (LOS) di lingkungan *outdoor* yang ditunjukkan secara berurutan pada Gambar 4.26, Gambar 4.27 dan Gambar 4.28.

Berdasarkan Gambar 4.26, Gambar 4.27 dan Gambar 4.28 untuk teknik modulasi QAM pada jarak 4 meter kondisi LOS, nilai BER 4-QAM mencapai 0 pada saat daya yang dipancarkan sebesar -26 dBm, sedangkan untuk jarak 5 meter nilai BER mencapai 0 pada saat daya yang dipancarkan sebesar -23,5 dBm, dan untuk jarak 6 meter nilai BER mencapai 0 saat daya pancar -20 dBm. Sama pada saat pengukuran di lingkungan *indoor* kondisi LOS, hal ini menandakan bahwa jarak dan daya pancar mempengaruhi kualitas kerja sistem komunikasi ini.

Tabel 4. 6 Data Hasil pengukuran *Indoor* untuk kondisi NLOS dengan jarak 6 meter

Gain	4 QAM	8 QAM	16 QAM	32 QAM	64 QAM
1 = 0	0,4899	0,5004	0,4996	0,4989	0,5005
2 = 4	0,4838	0,4996	0,4989	0,4987	0,5004
3 = 8	0,4564	0,4988	0,4987	0,4987	0,5001
4 = 12	0,4018	0,4917	0,4987	0,4957	0,4993
5 = 16	0,2884	0,4896	0,4957	0,4917	0,4989
6 = 20	0,2079	0,4764	0,4949	0,4892	0,4985
7 = 24	0,1401	0,4383	0,4833	0,4631	0,4978
8 = 28	0,0781	0,3757	0,4575	0,4325	0,4977
9 = 32	0,0288	0,2846	0,3987	0,3952	0,4969
10 = 36	0,0082	0,2062	0,3176	0,3719	0,4892
11 = 40	0,0014	0,1307	0,2457	0,3350	0,4631
12 = 44	0,0000	0,0762	0,1783	0,3176	0,4325
13 = 48	0,0000	0,0481	0,1487	0,2846	0,3952
14 = 52	0,0000	0,0228	0,1041	0,2457	0,3719
16 = 56	0,0000	0,0155	0,0723	0,2062	0,3350
17 = 60	0,0000	0,0146	0,0566	0,1783	0,3176



Gambar 4.26 Grafik BER Outdoor jarak 4 meter kondisi LOS

Tabel 4. 7 Data Hasil pengukuran *Outdoor* untuk kondisi LOS dengan jarak 4 meter

Gain	4 QAM	8 QAM	16 QAM	32 QAM	64 QAM
1 = 0	0,02045	0,07325	0,177728	0,21949405	0,388206
2 = 3	0,01886	0,057175	0,154989	0,19706659	0,352457
3 = 6	0,01395	0,042444	0,136583	0,1812066	0,337008
4 = 9	0,00883	0,038694	0,107233	0,16098098	0,295258
5 = 12	0,00421	0,035111	0,085618	0,14911111	0,271417
6 = 15	0,00097	0,02928	0,051244	0,13840833	0,257022
7 = 18	0,00021	0,001918	0,037469	0,12006231	0,246022
8 = 21	0,00000	0,000704	0,012011	0,09147778	0,225025
9 = 24	0,00000	0,000556	0,001798	0,07307605	0,209106
10 = 27	0,00000	0,000378	0,000979	0,05207719	0,187256
11 = 30	0,00000	0,000237	0,000694	0,03888889	0,165236
12 = 33	0,00000	0,00000	0,000556	0,01879944	0,132442
13 = 36	0,00000	0,00000	0,000278	0,0068025	0,107333
14 = 39	0,00000	0,00000	9,19E-05	0,00474333	0,094444
15 = 42	0,00000	0,00000	1,99E-05	0,00242778	0,061671
16 = 45	0,00000	0,00000	1,35E-05	0,00113889	0,046584
17 = 48	0,00000	0,00000	0,00000	0,00101611	0,016245
18 = 51	0,00000	0,00000	0,00000	0,0007725	0,010737
19 = 54	0,00000	0,00000	0,00000	0,0003775	0,009539
20 = 57	0,00000	0,00000	0,00000	0,0001111	0,009133
21 = 60	0,00000	0,00000	0,00000	0,00004754	0,007719

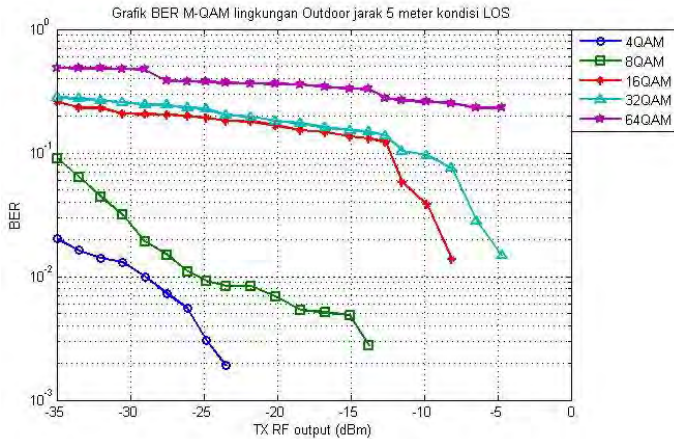
Dimana nilai BER semakin besar terhadap bertambahnya jarak antar *node* untuk daya pancar yang tetap tetap. Dan sebaliknya nilai BER semakin kecil terhadap bertambahnya daya yang dipancarkan untuk jarak antar *node* tetap. Ini juga berlaku untuk level modulasi (M) yang lebih tinggi seperti 8-QAM, 16-QAM, 32-QAM dan 64-QAM. Hanya saja jika level modulasi semakin tinggi maka jumlah *bit error* yang terjadi semakin banyak, ini menandakan bahwa level modulasi juga berpengaruh terhadap kinerja sistem.

Tabel 4. 8 Data Hasil pengukuran *Outdoor* untuk kondisi LOS dengan jarak 5 meter

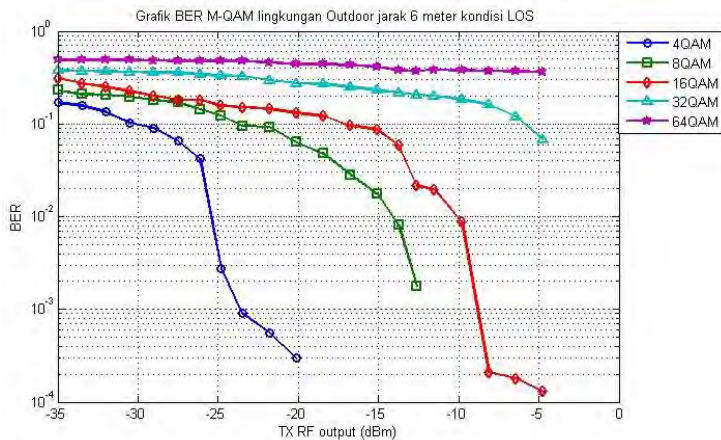
Gain	4 QAM	8 QAM	16 QAM	32 QAM	64 QAM
1 = 0	0,02028	0,09048	0,25853	0,28068	0,48741
2 = 3	0,01632	0,06338	0,23199	0,27481	0,48255
3 = 6	0,01409	0,04428	0,22995	0,26389	0,48115
4 = 9	0,01300	0,03139	0,20748	0,25674	0,47810
5 = 12	0,00993	0,01916	0,20491	0,24458	0,47191
6 = 15	0,00724	0,01493	0,20441	0,24357	0,38214
7 = 18	0,00551	0,01098	0,19847	0,23006	0,37668
8 = 21	0,00304	0,00921	0,19148	0,22670	0,37385
9 = 24	0,00191	0,00835	0,18160	0,20249	0,36763
10 = 27	0,00000	0,00834	0,17997	0,19494	0,36261
11 = 30	0,00000	0,00688	0,16572	0,18067	0,36036
12 = 33	0,00000	0,00537	0,15191	0,17207	0,35832
13 = 36	0,00000	0,00508	0,14601	0,16058	0,33884
14 = 39	0,00000	0,00488	0,13540	0,15201	0,33169
15 = 42	0,00000	0,00274	0,13093	0,14814	0,32734
16 = 45	0,00000	0,00000	0,12208	0,13776	0,27684
17 = 48	0,00000	0,00000	0,05799	0,10377	0,26416
18 = 51	0,00000	0,00000	0,03803	0,09539	0,25897
19 = 54	0,00000	0,00000	0,01389	0,07539	0,25097
20 = 57	0,00000	0,00000	0,00000	0,02799	0,23199
21 = 60	0,00000	0,00000	0,00000	0,01476	0,22995

Tabel 4. 9 Data Hasil pengukuran *Outdoor* untuk kondisi LOS dengan jarak 6 meter

Gain	4 QAM	8 QAM	16 QAM	32 QAM	64 QAM
1 = 0	0,17061	0,22995	0,30995	0,37668	0,49156
2 = 3	0,15769	0,20748	0,27483	0,37385	0,48966
3 = 6	0,13464	0,20491	0,24911	0,36763	0,48824
4 = 9	0,10291	0,19441	0,22441	0,36261	0,48568
5 = 12	0,09013	0,18148	0,20148	0,36036	0,48456
6 = 15	0,06510	0,17061	0,18160	0,35832	0,47735
7 = 18	0,04205	0,14308	0,17997	0,33884	0,47716
8 = 21	0,00275	0,12208	0,15719	0,33169	0,47678
9 = 24	0,00090	0,09539	0,15191	0,32734	0,47432
10 = 27	0,00056	0,09277	0,14601	0,29684	0,46096
11 = 30	0,00030	0,06375	0,13093	0,27416	0,44098
12 = 33	0,00000	0,04799	0,12208	0,26897	0,43844
13 = 36	0,00000	0,02803	0,09603	0,25097	0,43011
14 = 39	0,00000	0,01743	0,08630	0,23199	0,41336
15 = 42	0,00000	0,00811	0,05864	0,21748	0,37668
16 = 45	0,00000	0,00180	0,02148	0,20491	0,37385
17 = 48	0,00000	0,00000	0,01972	0,19953	0,38214
18 = 51	0,00000	0,00000	0,00878	0,18308	0,37668
19=54	0,00000	0,00000	0,00021	0,16208	0,37385
20 = 57	0,00000	0,00000	0,00018	0,12039	0,36763
21 = 60	0,00000	0,00000	0,00013	0,06799	0,36261



Gambar 4.27 Grafik BER Outdoor jarak 5 meter kondisi LOS



Gambar 4.28 Grafik BER Outdoor jarak 6 meter kondisi LOS

4.3.2 Kondisi *Non Line of Sight* (NLOS)

Berdasarkan data hasil pengukuran pada Tabel 4.10, Tabel 4.11 dan Tabel 4.12 maka diperoleh grafik BER untuk jarak 4 meter, 5 meter dan 6 meter pada kondisi *non line of sight* (NLOS) di lingkungan

outdoor yang ditunjukkan secara berutan pada Gambar 4.29, Gambar 4.30 dan Gambar 4.31.

Tabel 4. 10 Data Hasil pengukuran *Outdoor* untuk kondisi NLOS dengan jarak 6 meter

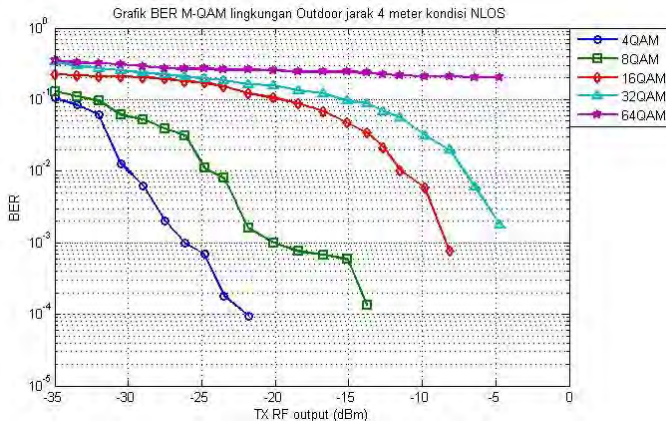
Gain	QAM	8-QAM	16-QAM	32-QAM	64-QAM
1 = 0	0,02045	0,07325	0,17773	0,21949	0,38821
2 = 3	0,01886	0,05718	0,15499	0,19707	0,35246
3 = 6	0,01395	0,04244	0,13658	0,18121	0,33701
4 = 9	0,00883	0,03869	0,10723	0,16098	0,29526
5 = 12	0,00421	0,03511	0,08562	0,14911	0,27142
6 = 15	0,00097	0,02928	0,05124	0,13841	0,25702
7 = 18	0,00021	0,00192	0,03747	0,12006	0,24602
8 = 21	0,00000	0,00070	0,01201	0,09148	0,22503
9 = 24	0,00000	0,00056	0,00180	0,07308	0,20911
10 = 27	0,00000	0,00038	0,00098	0,05208	0,18726
11 = 30	0,00000	0,00024	0,00069	0,03889	0,16524
12 = 33	0,00000	0,00000	0,00056	0,01880	0,13244
13 = 36	0,00000	0,00000	0,00028	0,00680	0,10733
14 = 39	0,00000	0,00000	0,00009	0,00474	0,09444
15 = 42	0,00000	0,00000	0,00002	0,00243	0,06167
16 = 45	0,00000	0,00000	0,00001	0,00114	0,04658
17 = 48	0,00000	0,00000	0,00000	0,00102	0,01625
18 = 51	0,00000	0,00000	0,00000	0,00077	0,01074
19 = 54	0,00000	0,00000	0,00000	0,00038	0,00954
20 = 57	0,00000	0,00000	0,00000	0,00011	0,00913
21 = 60	0,00000	0,00000	0,00000	0,00005	0,00772

Berdasarkan Gambar 4.29, Gambar 4.30 dan Gambar 4.31 untuk teknik modulasi QAM pada jarak 4 meter kondisi NLOS, nilai BER 4-QAM mencapai 0 pada saat daya yang dipancarkan sebesar -21,5 dBm, sedangkan untuk jarak 5 meter nilai BER mencapai 0 pada saat daya yang dipancarkan sebesar -16,5 dBm, dan untuk jarak 6 meter nilai BER

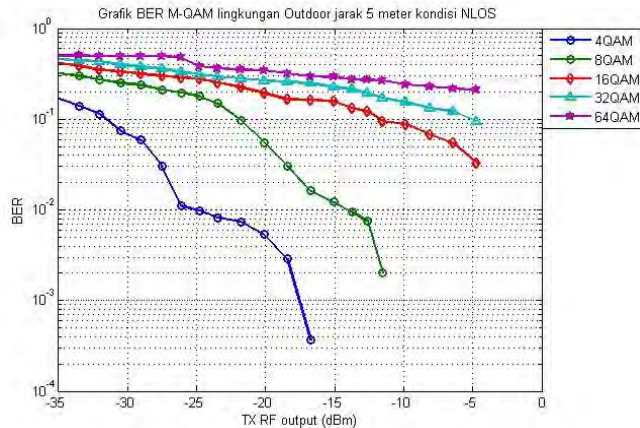
mencapai 0 saat daya pancar -15 dBm. Sama seperti pada pengukuran lingkungan *indoor* kondisi NLOS bahwa jarak dan daya pancar mempengaruhi kualitas kerja sistem komunikasi ini. Dimana nilai BER semakin besar terhadap bertambahnya jarak antar *node* untuk daya pancar yang tetap tetap. Dan sebaliknya nilai BER semakin kecil terhadap bertambahnya daya yang dipancarkan untuk jarak antar *node* tetap. Ini juga berlaku untuk level modulasi (M) yang lebih tinggi seperti 8-QAM, 16-QAM, 32-QAM dan 64-QAM.

Tabel 4. 11 Data Hasil pengukuran *Outdoor* untuk kondisi NLOS dengan jarak 5 meter

Gain	4 QAM	8 QAM	16 QAM	32 QAM	64 QAM
1 = 0	0,16824	0,32056	0,41399	0,45749	0,49892
2 = 3	0,14048	0,30083	0,38538	0,44012	0,49832
3 = 6	0,11378	0,27526	0,35156	0,43486	0,49798
4 = 9	0,07428	0,25142	0,33602	0,39983	0,49793
5 = 12	0,05889	0,23702	0,31556	0,37591	0,49580
6 = 15	0,03016	0,21020	0,30106	0,35893	0,49475
7 = 18	0,01099	0,19524	0,28733	0,33202	0,47497
8 = 21	0,00978	0,17924	0,27794	0,30948	0,38230
9 = 24	0,00821	0,14936	0,25167	0,29362	0,36140
10 = 27	0,00735	0,09673	0,22458	0,28024	0,35001
11 = 30	0,00534	0,05499	0,19390	0,26735	0,34407
12 = 33	0,00288	0,03066	0,16584	0,25642	0,32104
13 = 36	0,00037	0,01618	0,16245	0,24933	0,29720
14 = 39	0,00000	0,01223	0,15737	0,22466	0,28995
15 = 42	0,00000	0,00944	0,13343	0,21435	0,27362
16 = 45	0,00000	0,00747	0,12208	0,19324	0,27024
17 = 48	0,00000	0,00201	0,09539	0,17242	0,26735
18 = 51	0,00000	0,00000	0,08799	0,15237	0,24142
19 = 54	0,00000	0,00000	0,06803	0,13343	0,22702
20 = 57	0,00000	0,00000	0,05468	0,12208	0,21602
21 = 60	0,00000	0,00000	0,03267	0,09539	0,20903



Gambar 4.29 Grafik BER Outdoor jarak 4 meter kondisi NLOS



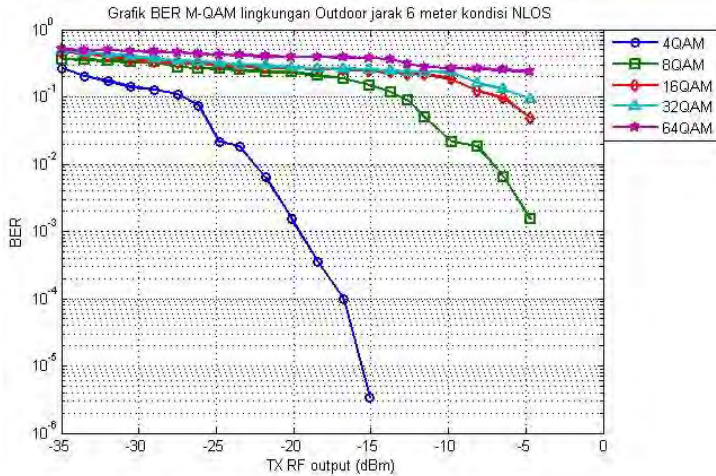
Gambar 4.30 Grafik BER Outdoor jarak 5 meter kondisi NLOS

Jika dibandingkan hasil pengukuran di lingkungan *indoor* dengan di lingkungan *outdoor*, hasil pengukuran di lingkungan *outdoor* jauh lebih baik jika dibandingkan dengan hasil pengukuran di lingkungan *outdoor*. Ini berlaku untuk pengukuran pada kondisi *line of sight* (LOS) dan *non line of sight* (NLOS). *Sample* perbandingan untuk hasil pengukuran di lingkungan *indoor* dan di lingkungan *outdoor* dapat dilihat pada Gambar 4.32, dimana nilai BER untuk 4-QAM kondisi

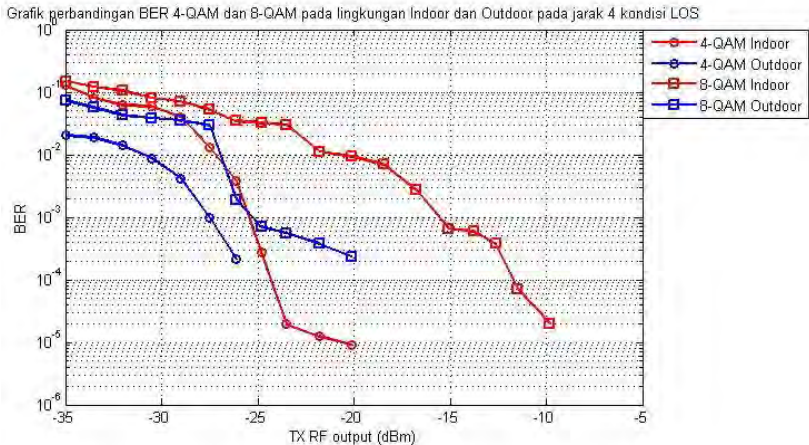
outdoor mencapai nilai nol saat daya yang dipancarkan sebesar -26 dBm sedangkan untuk kondisi *indoor* pada jarak dan level modulasi yang sama, daya pancar yang dibutuhkan untuk mencapai BER sama dengan nol adalah -21,2 dBm. Sedangkan *sample* untuk perbandingan kondisi LOS dan NLOS dapat dilihat pada Gambar 4.33 dan gambar hasil pengukuran kinerja 4-QAM untuk jarak 4 meter, 5 meter dan 6 meter pada lingkungan *outdoor* dapat dilihat pada Gambar 4.34.

Tabel 4. 12 Data Hasil pengukuran *Outdoor* untuk kondisi NLOS dengan jarak 6 meter

Gain	4 QAM	8 QAM	16 QAM	32 QAM	64 QAM
1 = 0	0,2682	0,3649	0,4575	0,4883	0,4991
2 = 3	0,2022	0,3583	0,4363	0,4538	0,4968
3 = 6	0,1706	0,3388	0,3986	0,4288	0,4935
4 = 9	0,1405	0,3317	0,3538	0,3963	0,4778
5 = 12	0,1276	0,3273	0,3259	0,3661	0,4651
6 = 15	0,1088	0,2768	0,3189	0,3410	0,4577
7 = 18	0,0738	0,2642	0,3120	0,3322	0,4302
8 = 21	0,0216	0,2590	0,2899	0,3189	0,4255
9 = 24	0,0184	0,2510	0,2736	0,2956	0,4171
10 = 27	0,0064	0,2320	0,2702	0,2908	0,4008
11 = 30	0,0015	0,2300	0,2673	0,2695	0,3910
12 = 33	0,0003	0,2075	0,2621	0,2677	0,3894
13 = 36	0,0001	0,1857	0,2571	0,2617	0,3825
14 = 39	0,0000	0,1490	0,2432	0,2541	0,3791
16 = 45	0,0000	0,1169	0,2335	0,2424	0,3610
15 = 42	0,0000	0,0888	0,2175	0,2372	0,3110
17 = 48	0,0000	0,0491	0,2149	0,2346	0,2768
18 = 51	0,0000	0,0216	0,1831	0,2300	0,2642
19 = 54	0,0000	0,0184	0,1221	0,1621	0,2590
20 = 57	0,0000	0,0064	0,0954	0,1304	0,2510
21 = 60	0,0000	0,0015	0,0480	0,0938	0,2320

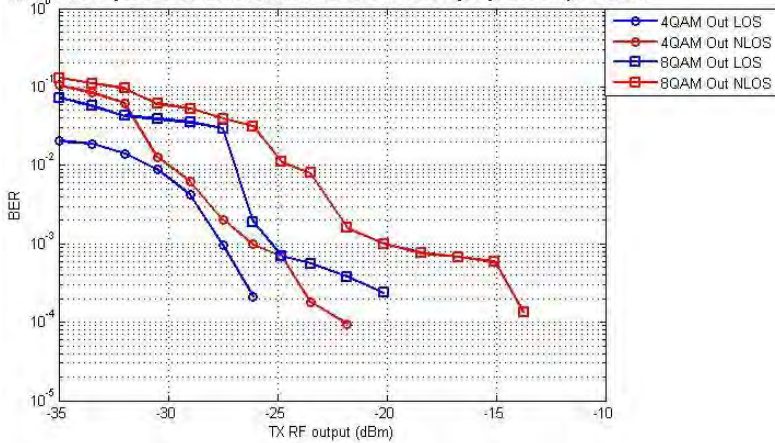


Gambar 4.31 Grafik BER Outdoor jarak 6 meter kondisi NLOS



Gambar 4.32 Grafik perbandingan BER 4-QAM dan 8-QAM pada lingkungan *indoor* dan *outdoor* pada jarak 4 meter kondisi LOS

Kurva Perbandingan BER 4QAM dan 8-QAM untuk kondisi NLOS di lingkungan Outdoor jarak 5 meter



Gambar 4.33 Grafik perbandingan BER 4-QAM dan 8-QAM pada lingkungan *outdoor* pada jarak 5 meter kondisi LOS



Gambar 4.34 Grafik perbandingan BER 4-QAM untuk jarak 4, 5, dan 6 meter pada lingkungan *outdoor*

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan pembahasan yang telah dilakukan pada Bab IV, maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Perbandingan kinerja sistem komunikasi SISO dengan teknik modulasi M-QAM ditunjukkan pada nilai BER yang diperoleh dengan mengubah jarak antar *node* pengirim dan penerima.
2. Untuk pengukuran di lingkungan *indoor* pada kondisi LOS, hasil pengukuran dengan nilai BER terkecil diperoleh pada saat pengukuran dengan jarak 4 meter. Dimana dibutuhkan daya pancar yang lebih kecil untuk mencapai nilai nol jika dibandingkan dengan jarak 5 meter dan 6 meter untuk level modulasi yang sama. Untuk 4-QAM membutuhkan daya pancar sebesar -21,2 dBm dan untuk jarak 5 meter dan 6 meter adalah -21 dBm dan -14,5 dBm.
3. Untuk pengukuran di lingkungan *indoor* pada kondisi NLOS, hasil pengukuran dengan nilai BER terkecil diperoleh pada saat pengukuran dengan jarak 4 meter. Dimana dibutuhkan daya pancar yang lebih kecil untuk mencapai nilai nol jika dibandingkan dengan jarak 5 meter dan 6 meter untuk level modulasi yang sama. Untuk 4-QAM membutuhkan daya pancar sebesar -19 dBm dan untuk jarak 5 meter dan 6 meter adalah -17 dBm dan -12 dBm.
4. Nilai BER semakin besar terhadap bertambahnya jarak antar *node* untuk daya pancar tetap, ini menandakan jarak sangat mempengaruhi kualitas kinerja teknik modulasi M-QAM pada WARP. Ini dapat dilihat pada BAB IV pada Gambar 4.34, dimana nilai BER untuk 4-QAM mencapai nilai 0 untuk jarak 4 meter hanya membutuhkan daya pancar -26 dBm, nilai ini lebih kecil jika dibandingkan dengan daya pancar yang dibutuhkan pada saat jarak 5 meter dan 6 meter yaitu -23,5 dan -20. Hal ini menandakan daya pancar mempengaruhi kinerja sistem modulasi M-QAM pada WARP.
5. Hasil pengukuran di lingkungan *outdoor* memiliki nilai BER yang lebih kecil dibandingkan saat pengukuran di lingkungan *indoor*. Ini dapat dilihat pada Gambar 4.32, dimana nilai BER untuk 4-QAM dan 8-QAM pada lingkungan *outdoor* lebih kecil dibandingkan untuk 4-QAM dan 8-QAM pada

lingkungan *indoor*. Ini disebabkan karena kondisi lingkungan indoor memiliki pantulan yang besar dibandingkan kondisi outdoor

6. Hasil pengukuran tidak tetap karena kondisi kanal yang real yang tidak tetap performanya. Oleh karena itu terdapat beberapa hasil pengukuran tidak sesuai dengan apa yang diharapkan.
7. Level modulasi berbanding lurus dengan nilai BER yang dihasilkan, semakin tinggi level modulasi yang digunakan, maka semakin tinggi pula nilai BER yang dihasilkan yang menyebabkan kinerja sistem menjadi tidak maksimal.
8. Nilai BER semakin kecil terhadap bertambahnya daya yang dipancarkan untuk jarak antar *node* tetap.

5.2 Saran

Mencoba mengirimkan Informasi berupa suara, *image*, atau video.

LAMPIRAN A

Jurusan Teknik Elektro – FTI
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

TE 141599 TUGAS AKHIR – 4 SKS

Nama Mahasiswa : Fanny Ananta Marpalinda
Nomer Pokok : 2212106027
Bidang Studi : Teknik Telekomunikasi dan Multimedia
Tugas Diberikan : Semester Gasal 2014/2015
Dosen Pembimbing : 1. Dr. Ir. Suwadi, MT
2. Dr. Ir. Titiek Suryani, MT
Judul Tugas Akhir : **Implementasi dan Evaluasi Kinerja Sistem Komunikasi M-ary Quadrature Amplitude Modulation (M-QAM) Menggunakan *Wireless Open-Access Research Platform* (WARP)**
(Implementation and Performance Evaluation of M-ary Quadrature Amplitude Modulation (M-QAM) Communications Systems Using Wireless Open-Access Research Platform (WARP))

23 SEP 2014

Uraian Tugas Akhir :

Teknik modulasi digital dalam dunia telekomunikasi telah berkembang dengan cepat, namun bukan berarti teknik modulasi yang mendasari perkembangan teknik modulasi yang baru tidak digunakan lagi. Salah satunya adalah teknik modulasi M-ary Quadrature Amplitude Modulation (QAM). Teknik modulasi M-QAM digunakan dalam penransmisi pada laju bit-bit yang lebih tinggi pada saluran/kanal dengan lebar pita yang terbatas. Implementasi M-QAM pada *Wireless Open-Access Research Platform* (WARP) yang merupakan salah satu jenis SDR (*Software Defined Radio*). Modul WARP tersebut akan digunakan sebagai model pemancar dan penerima pada pengukuran kualitas unjuk kinerja sistem M-QAM. Sehingga akan diketahui sampai level berapa M-QAM dapat diimplementasikan pada WARP dengan menggunakan *software* MATLAB. Pengukuran kualitas kinerja teknik modulasi M-QAM akan dilakukan pada lingkungan *indoor* dan *outdoor*. Hasil yang diharapkan yaitu mengetahui hingga M (tingkat modulasi) berapa teknik modulasi M-QAM dapat diterapkan pada WARP dengan meninjau *Bit Error Rate* (BER) pada lingkungan *indoor* dan *outdoor*.

Kata Kunci : M-QAM, WARP, *Bit Error Rate*

Dosen Pembimbing I


Dr. Ir. Suwadi, MT
NIP. 19680818 1993031 002
Mengetahui,
Jurusan Teknik Elektro FTI-ITS
Ketua,

Dr. Tri Arief Sardiono, ST, MT
NIP. 19700212 1995121 001

Dosen Pembimbing II



Dr. Ir. Titiek Suryani, MT
NIP. 19641130 1989032 001
Menyetujui,
Bidang Studi Telekomunikasi Multimedia
Koordinator,

Dr. Ir. Endroyono, D.E.A
NIP. 19650404 1991021 001

Gambar A.1 Lembar Pengesahan Proposal Tugas Akhir

Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN B



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

Kampus ITS Gedung B & C Sukolilo Surabaya - 60111
Telp. (031) 594 7302, 5994251 s/d 54 Pes. 1206
Fax. (031) 5931237
e-mail : elits@ee.its.ac.id
Website: <http://www.ee.its.ac.id>

MONITORING KEGIATAN TUGAS AKHIR

Nama Mahasiswa : Fanny Ananta M

Judul Tugas Akhir : Implementasi dan Evaluasi Kinerja Sistem komunikasi M-ary Quadrature Amplitude Modulation (M-QAM) menggunakan WARP

Bulan Proposal Disahkan : September 2014

































Dosen Pembimbing 1 : Dr. Ir. Suwadi, MT

Dosen Pembimbing 2 : Dr. Ir. Titrek Suryana, MT

Nrp 2212106027

NIP 19680818 1993031 002

NIP 19641130 1989032 001

No	Tanggal	Uraian Kegiatan	Tanda Tangan		Mahasiswa	Keterangan
			Pembimbing (1)	Pembimbing (2)		
1	23 Sept 2014	Mempelajari program Tx				
2	30 Sept 2014	Mempelajari Teori M-QAM				
3	10 Okt 2014	Menunjukkan Program Simulasi antenna Tx dan Rx				
4	17 Okt 2014	Menunjukkan hasil Simulasi SSQ QAM				
5	24 Okt 2014	Revisi program hasil Simulasi				
6	31 Okt 2014	Menunjukkan Program hasil revisi				
7	4 Nov 2014	Konsultasi tentang Program fix				
8	11 Nov 2014	Konsultasi tentang hasil Pengukuran Indoor				
9	18 Nov 2014	Konsultasi hasil pengukuran Indoor MLO				
10	25 Nov 2014	Konsultasi hasil pengukuran outdoor LOS				
11	2 Des 2014	Konsultasi hasil pengukuran outdoor MLO				
12	9 Des 2014	Konsultasi analisa hasil pengukuran LOS dan MLO				
13	16 Des 2014	Konsultasi analisa hasil pengukuran outdoor dan Indoor				
14	19 Des 2014	Menyerahkan laporan TA Bab I - Bab III				
15	24 Des 2014	Menyerahkan laporan lengkap				
16	29 Des 2014	Menyerahkan laporan revisi Bab I - Bab V				

Gambar B.1 Lembar Monitoring Tugas Akhir

Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN C

Program 1

```
% Inisialisasi.m
% Proses inisialisasi sistem. dimana Hal yang
% dilakukan adalah sebagai berikut:
%   - Definisi vektor waktu
%   - Definisi Frekuensi sampling sistem
%   - Definisi sistem modulasi

%Frek. sampling dan waktu sampling
Fs = 40e6;
Ts = 1/Fs;

%Vektor waktu
L = 2^14;
t = (0:L-1)/Fs;

%Sistem modulasi yang digunakan
M = 4;
k = log2(M);
if M > 2
    ph_off = 0;
    h_bb_mod =
modem.qammod('M',M,'PhaseOffset',ph_off);
    h_bb_demod =
modem.qamdemod('M',M,'PhaseOffset',ph_off);
else
    h_bb_mod = modem.qammod('M',M);
    h_bb_demod = modem.qamdemod('M',M);
end
```

Program 2

```
% Proses pembentukan frame untuk proses
% transmisi data. Pada tiap-tiap
% langkah akan dijabarkan proses pembentukan
% frame.

%Data bit
```



```

% definisi data biner yang ditransmisikan. Data
bisa berbentuk apapun,
% misalnya, biner acak/ data dari
suara/gambar/video

%Random binary
n_bits = 120000
n_bin = randi([0 1],n_bits,1);
n_syms = n_bits/k;
n_sym = reshape(n_bin,n_syms,k);
n_dat = bi2de(n_sym,'left-msb');

%Menghitung total data payload yang dibutuhkan,
setelah dikurangi preamble,
%txDelay dan CSI bits
%Menentukan symbol rate, mencari nilai upsample
rate untuk SRRC Filter. Satuan
%symbol rate adalah symbol/s
Rsym = 4e6;
nsamp = floor(Fs/Rsym);

%Nilai nsamp harus integer, setelah pembulatan
kebawah, hitung rate simbol
%sebenarnya.
Rsym = Fs/nsamp;

%Pembentukan Preamble
% Preamble bertujuan untuk penentuan titik
sampling pertama pada penerima.
%pream = [-1;-1;-1;1;-1;0;0;0;0;0;0;0;0];
pream = [0;0;0;0;-1+1i;1-1i;-1+1i;-1+1i;-1+1i;1-
1i;-1+1i;0;0;0;0;0;0;0;0];
pream_len = length(pream);

%Correlation Matrix
% Pembentukan matriks korelasi preamble
corr_win = 300; %at least corr_win >=
pream_up = upsample(pream,nsamp);
ref_vect = zeros(corr_win,1);
ref_vect(1:length(pream_up)) = pream_up;

```

```

ref_matx =
toeplitz(ref_vect,circshift(ref_vect(corr_win:-
1:1),1));

%Definisi Transmission delay
% Panjang frame L akan dikurangi sejumlah delay
untuk menangani
% transmission delay. Jika semua frame terisi
informasi, ketika terjadi
% delay pada proses transmisi, maka akan ada
data yang tidak tertangkap
% pada penerima. Sehingga diperlukan delay
transmisi. Satuan : sampel
txDelay = 400;

%Phase ambiguity detector/ Channel State
Information sequence
% Bertujuan untuk menangani ambiguitas
fasa/perputaran pada konstellasi.
% Agar sistem SIMO bisa berfungsi dengan baik,
data yang diterima harus
% terletak pada kuadran yang sesuai. Gunakan CSI
dengan nilai 1
CSI_syms = 150; %Jumlah simbol untuk CSI
CSI_dat = ones(CSI_syms,1);

%Desain Square Root Raised Cosine
%Parameter desain menggunakan nsamp sebagai
upsample rate, N_SRRRC sebagai
%orde filter dan roll-off factor R_SRRRC
shape = 'Square Root Raised Cosine';
N_Ord = 6; %Genap
R_SRRRC = 0.9; %[0-1]
SRRRC_spec =
fdesign.pulseshaping(nsamp,shape,'Nsym,Beta',N_O
rd,R_SRRRC);
h_SRRRC = design(SRRRC_spec);
flt_delay = h_SRRRC.order/2; %or nsamp*N_Ord
norm_factor = max(h_SRRRC.numerator);
h_SRRRC.numerator = h_SRRRC.numerator/norm_factor;
%Normalisasi filter

```

```

%Jumlah simbol maksimum yang bisa dimuat dalam
satu transmission frame,
%data_sym mencakup CSI dan data yang
ditransmisikan
data_sym = floor((L-(pream_len*nsamp)-txDelay-
flt_delay)/nsamp);

%Baseband Modulation
% Mulai proses modulasi baseband (BB). Kecuali
preamble dan CSI, semua
% symbol frame akan mengalami modulasi baseband.
n_sym_dat = modulate(h_bb_mod,n_dat);

%Bit stuffing and frame construction
% Bit stuffing adalah memasukan symbol 1 (CSI)
secara periodik dalam 1
% frame transmisi. Fungsi bit stuffing ini
adalah sebagai metode untuk
% melakukan interpolasi dan estimasi kanal pada
penerima. Dalam satu frame
% transmisi akan memiliki total simbol <=
data_sym tergantung dari jumlah
% symbol CSI yang digunakan.
% Representasi grafis bit stuffing:
% |-----data_sym-----
-----|
% CSI - <sub-frames> -- CSI - <sub-frames> --
... - <sub-frames> -- CSI

%Tentukan jumlah simbol data diantara simbol CSI
sym_size = floor(data_sym/(CSI_syms-1))-1;
%Tentukan total sub-frame data
sub_frame = CSI_syms-1;
%Total panjang frame aktual dengan stuffed bits
fr_len = sub_frame*sym_size + CSI_syms;
%Update nilai data_sym
data_sym = fr_len - CSI_syms;
%Hitung total frame data, hitung padding,
tambahkan bit stuffing
n_frames = ceil(n_syms/data_sym);

```

```

stuff_sym = [upsample(CSI_dat(1:CSI_syms-
1),sym_size+1);CSI_dat(end)];
n_dat_fr = repmat(stuff_sym,1,n_frames);
pad = n_frames*data_sym - n_syms;
%Tambahkan zero padding pada symbol
n_sym_dat = [n_sym_dat;zeros(pad,1)];
%Reshape n_sym_dat
n_sym_dat =
reshape(n_sym_dat,data_sym,n_frames);

%Bagi data menjadi beberapa frame, tambahkan bit
stuffing
for ii=1:n_frames
    n_dat_fr(:,ii) =
sym_stuffing(n_dat_fr(:,ii),n_sym_dat(:,ii),sym_
size);
end

%Tambahkan preamble
temp_mat1 = repmat(pream,1,n_frames);
xt_dat = [temp_mat1;n_dat_fr];

%Interpolasi, matched filtering, tambahkan
filter delay
xt_mf_bb =
filter(h_SRRC,[upsample(xt_dat,nsamp);zeros(flt_
delay,n_frames)]);
xt_mf = zeros(size(xt_mf_bb));

%Clear unused variables
clear temp_mat1 stuff_sym n_sym

%Upconvert semua frame, normalisasi
time = [(0:length(xt_mf)-1)/Fs].';
f = 5e6;
for ii=1:n_frames
    xt_mf(:,ii) =
xt_mf_bb(:,ii).*exp(1i*2*pi*f*time);
    norm_fact = max( [ max(real(xt_mf(:,ii))) ,
max(imag(xt_mf(:,ii))) ] );
    %Normalize frame

```

```

        xt_mf(:,ii) = xt_mf(:,ii)./norm_fact;
end

% fig_title='Power Spektral Density'
% [y0_psd,f0,y0_psd2,f02,aa,bb,cc] =
show_spectrum(xt_mf,xt_mf,Fs,fig_title);

```

Program 3

```

%%FRAME_RX
% File ini akan menjalankan proses demodulasi
hasil transmisi pada WARP.
% Proses demodulasi meliputi:
%   - Sinkronisasi
%   - Downconvert
%   - Matched Filtering
%   - Timing recovery (Preamble)
%   - Baseband demodulation
% Setelah proses baseband modulation, skema SIMO
dilakukan pada
% simbol-simbol yang diterima pada kanal yang
berbeda. Kemudian proses hard
% detection dilakukan, lalu perhitungan bit
error rate

%Sinkronisasi dan Downconvert semua frame
time = ((0:length(rx_IQ)-1)/Fs).';
rx_IQ_disp = rx_IQ;
for ii=1:n_frames
    %vco_sig = syn_frame(rx_IQ(:,ii),f,Fs);
    vco_sig = exp(1i*2*pi*f*time);
    rx_IQ(:,ii) = rx_IQ(:,ii).*conj(vco_sig);
end

%Sinkronisasi fasa

%Matched filtering
hrx_SRRC = design(SRRC_spec);
hrx_SRRC.numerator = hrx_SRRC.numerator *
(norm_factor*nsamp);

```

```

yt_mf =
filter(hrx_SRRC,[rx_IQ;zeros(flt_delay,n_frames)
]);

yt_rx_data = zeros(size(n_dat_fr));
z_sym = zeros(size(n_sym_dat));
ch_est = zeros(size(n_dat_fr));

%Deteksi simbol pertama pada tiap-tiap frame
for ii=1:n_frames
    temp_vct1 = yt_mf(:,ii);

    %Cari korelasi tertinggi
    correlation = abs( (temp_vct1(1:corr_win)')
* ref_matx );
    pream_start = find(correlation ==
max(correlation));
    first_sample = pream_start+length(pream_up);

    %Downsampling
    temp_vct2 = temp_vct1(first_sample:end);

    %Determine Maximum likelihood first optimum
sampling point
    %ML_samp = ML_first_sym(temp_vct2,nsamp);
    %Start sampling at initial point
    temp_vct3 =
downsample(temp_vct2(1:end),nsamp);

    %Trim
    temp_vct3 = temp_vct3(1:fr_len);

    %Save trimmed vector
    yt_rx_data(:,ii) = temp_vct3;

    %Estimasi kanal
    ch_est(:,ii) =
estimate_chan(yt_rx_data(:,ii),sym_size);

```

```

        %Hasil kali yr_rx_data dengan konjugat dari
        estimasi kanal
        %      yt_rx_data(:,ii) = yt_rx_data(:,ii).*exp(-
        li*angle(ch_est(:,ii)));

        %Received symbols:
        temp_vct3 =
        yt_rx_data(:,ii).*conj(ch_est(:,ii));
        multip = [abs(ch_est(:,ii)).^2];
        yt_rx_data(:,ii) = (temp_vct3)./multip;

        %Symbol de-stuffing
        temp_vct3 =
        sym_destuffing(yt_rx_data(:,ii),sym_size);

        %Potong semua frame CSI, kumpulkan hasil
        data pada matriks tertentu
        z_sym(:,ii) = temp_vct3;
    end

    %Save memory
    clear temp_vct1 temp_vct2 temp_vct3
    %Save more memory

    %Ubah yt_rx_data menjadi vektor, potong yt_syms
    yt_syms = reshape(z_sym,data_sym*n_frames,1);
    yt_syms = yt_syms(1:length(n_dat));

    %Demodulasi
    z_sym = demodulate(h_bb_demod,yt_syms);

    %Potong z_sym agar memiliki panjang sama dengan
    n_dat
    z_sym = z_sym(1:length(n_dat));
    rx_siso= z_sym;

    yy= de2bi(rx_siso,'left-msb');
    rx_bit=reshape(yy,1,[]);

    [num_err, SER_SISO] = biterr(z_sym,n_dat)

```

Lampiran D



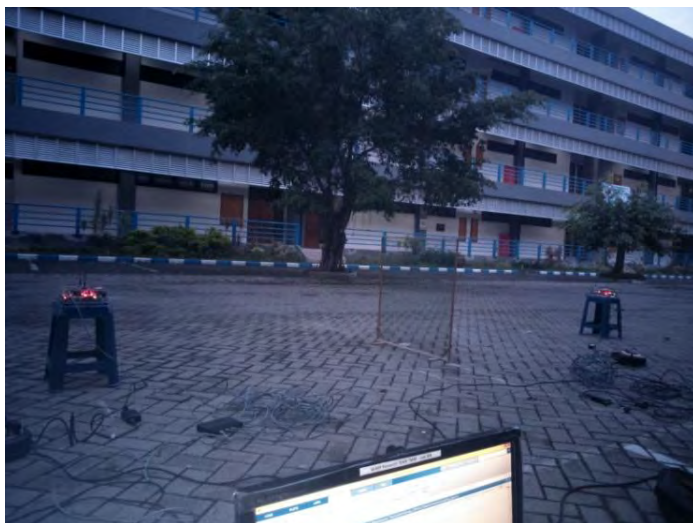
Gambar D.1 Pengukuran pada lingkungan Indoor dengan jarak 4 meter LOS



Gambar D.2 Pengukuran pada lingkungan *Outdoor* dengan jarak 4 meter LOS



Gambar D.3 Pengukuran pada lingkungan *Outdoor* dengan jarak 4 meter LOS



Gambar D.4 Pengukuran pada lingkungan *Outdoor* dengan jarak 4 meter NLOS

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Madhow, Upamanyu. *Fundamentals of Digital Communications*: New York : Cambridge University Press, 2008.
- [2]. Proakis, John G. "*Digital Communications 4th edition*".s.1: McGraw-Hill Science. 2000
- [3]. Amiri, K., Sun, Y., Murphy, P., Hunter, C., Cavallaro, J. R., & Sabharwal, A. "WARP, a Unified Wireless Network Testbed for Education and Research". IEEE International Conference on Microelectronic Systems Education. 2007
- [4]. Rappaport, Theodore S. "*Wireless Communication Principles and Practice*". V-soft.net. 1996
- [5]. Wilson, Stephen G. "*Digital Modulation and Coding*". Prentice-hall International. 1996
- [6]. K, Kisiel. D, Sahota. G, Swaminathan. "*Quadrature Amplitude Modulation : A simulation study*". Simon Frasier University. Canada. 2005
- [7]. WARPLab 6 Framework overview. *WARP Project – Wireless Open Access Research Platform*. [Online] September 2014. [Disunting: September 12, 2014.] <http://warpproject.org/trac/wiki/WARPLab6>.
- [8]. Murphy, P., Subharwal, A., Aazhang, B., Design Of WARP, A *Wireless Open-Access Research Platform*. 5, 1-5
- [9]. WARP radio board overview - Wireless Open Access Research *Platform*. [Online] September 2014. [Disunting: September 12, 2014.]
- [10]. http://warpproject.org/trac/wiki/HardwareUsersGuides/RadioBoard_v1.4.
- [11]. Sklar, Bernard. "*Digital Communications Fundamentals and Applications 2^{end} edition*".California: Prentice Hall.1987
- [12]. Sri Hartanto, 2010. Pengurangan Bit Error Pada Modulasi M-QAM Dalam Kanal Rayleigh Fading Dengan Teknik Spatial Multiplexing Dan Metode ZF-SIC, MMSE-SIC, Maximum Likelihood. Tesis. Universitas Indonesia
- [13]. Daniel Aspel, 2004. Adaptive Multilevel Quadrature Amplitude Radio Implementation in Programmable Logic. Thesis. University of Saskatchewan

Halaman ini sengaja dikosongkan

RIWAYAT HIDUP



Fanny Ananta Marpalinda dilahirkan di Padang pada tanggal 15 Juli 1992. Penulis merupakan anak pertama dari pasangan Irfan dan Sri Ewaldi, S.Pd. Penulis memulai pendidikan formal di SD N 32 Marapalam, Padang dari tahun 1997-2003, SMP N 7 Padang pada tahun 2003-2006, SMA N 7 Padang pada tahun 2006-2009. Setelah lulus SMA penulis melanjutkan studi D3 di Politeknik Negeri Jakarta, Jurusan Teknik Elektro, Program Studi Teknik Telekomunikasi pada tahun 2009-2012 dan pada tahun

2012 penulis melanjutkan studi strata 1 (S1) di Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Fakultas Teknologi Informasi, Jurusan Teknik Elektro Program Studi Telekomunikasi Multimedia. Penulis menulis buku ini sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana.